



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

Área Académica de Ingeniería y Arquitectura

**Diseño y análisis de un concreto modificado con tezontle para uso
estructural**

TESIS

Que para obtener el grado de licenciado en Ingeniería Civil

Presenta

Juan Alexis González Hernández

Directora:

Dra. Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola

Co-director:

Dr. Luis Daimir López León

Febrero 2024





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 23 de enero de 2024

Número de control: ICBI-D/083/2024
Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio le comunico que el Jurado asignado al Pasante de la Licenciatura en Ingeniería Civil **Juan Alexis González Hernández**, quien presenta el trabajo de titulación “**Diseño y análisis de un concreto modificado con tezontle para uso estructural**”, después de revisar el trabajo en reunión de Sinodales ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente Dr. Francisco Javier Olguín Coca

Secretario: Dr. Luis Daimir López León

Vocal: Dra. Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola

Suplente: Dr. Iván Erick Castañeda Robles

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
“Amor, Orden y Progreso”

Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval
Director del ICBI



OAASYCC

Ciudad del Conocimiento
Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Colonia
Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 ext. 2231 Fax 2109
direccion_icbi@uaeh.edu.mx



www.uaeh.edu.mx

Resumen

Esta investigación se enfoca en el diseño y análisis de un concreto estructural ligero, en el cual se sustituyó parcialmente el agregado grueso por gravas de tezontle. El objetivo general de este estudio consistió en obtener resistencias similares a las del concreto convencional, pero con una menor densidad y proponer recomendaciones de diseño y elaboración de la mezcla para mejorar su calidad durante el proceso de autoconstrucción. Además de las pruebas mecánicas comunes, el concreto se sometió a pruebas de oxidación y corrosión para evaluar posibles problemas de absorción y humedad interna que afecten sus propiedades mecánicas. Para lograr este objetivo, se siguió la norma nacional que describe los parámetros de diseño de una mezcla de concreto. Se elaboraron cilindros de concreto por triplicado con diferentes porcentajes de sustitución de tezontle (en total 27 cilindros) y se evaluaron los factores que afectan su resistencia y durabilidad. Los resultados más sobresalientes de este estudio indican que es posible obtener un concreto estructural ligero con una resistencia similar a la del concreto convencional, sustituyendo el 25% de su contenido de gravas con tezontle. Además, se encontró que el concreto modificado presenta una menor absorción de agua y una mayor resistencia a la corrosión. En conclusión, este estudio demuestra que la sustitución parcial del agregado grueso por tezontle puede mejorar las propiedades mecánicas del concreto, sin comprometer su resistencia y durabilidad. Esto puede tener importantes implicaciones en la construcción de estructuras más ligeras y resistentes, lo que puede reducir los costos y mejorar la eficiencia en la construcción.

Palabras clave: concreto estructural, deterioro de materiales, escoria volcánica, peso unitario.

Abstract

This research focuses on the design and analysis of lightweight structural concrete, in which the coarse aggregate was partially replaced by tezontle gravel. The general objective of this study was to obtain compressive strengths similar to those of conventional concrete, but with a lower density and to propose recommendations for the design and preparation of the mix to improve its quality during the self-construction process. In addition to standard mechanical tests, the concrete was subjected to oxidation and corrosion tests to evaluate possible absorption and internal moisture problems that affect its mechanical properties. To achieve this objective, the national standard that describes the design parameters of a concrete mix was followed. Concrete cylinders were made by triplicate with different percentages of tezontle substitution (in total 27 cylinders), and the factors that affect their compressive strength and durability were evaluated. The most outstanding results of this study indicate that it is possible to obtain a light structural concrete with a resistance similar to that of conventional concrete, replacing 25% of its gravel content with tezontle. In addition, it was found that modified concrete has lower water absorption and greater resistance to corrosion. In conclusion, this study demonstrates that the partial replacement of coarse aggregate with tezontle can improve the mechanical properties of concrete without compromising its compressive strength and durability. This can have important implications for building lighter and stronger structures, which can reduce costs and improve construction efficiency.

Keywords: structural concrete, deterioration of materials, volcanic slag, unit weight.

ÍNDICE

	Página
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.1.1 Uso del concreto en diferentes etapas de la humanidad	1
Usos del concreto en las antiguas civilizaciones	1
El concreto en la revolución industrial	2
Funciones del concreto en la actualidad	2
1.1.2 Modificaciones en el concreto a través de la historia.	2
Modificaciones en el cemento	2
Modificaciones en los agregados	3
Modificaciones en los aditivos	3
1.2 Planteamiento del problema	4
1.3 Justificación	6
1.4 Hipótesis	7
1.5 Objetivo general	7
1.5.1 Objetivos específicos	7
1.6 Metas	7
1.7 Alcances y limitaciones	8
1.8 Objeto de estudio	8
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	9
2.1 Introducción	9
2.2 Normativa para el diseño de un concreto ligero	9
2.3 Escorias volcánicas	10
2.4 Incorporación de escorias volcánicas en el concreto	10
2.5 Consideraciones sobre el uso del tezontle en concretos	11
2.6 Desventajas al usar escorias volcánicas en el concreto	12
2.7 Normativa para concretos diseñados con escorias volcánicas	13
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	15

3.1 Introducción	15
3.2 Descripción de materiales	15
3.2.1 Cemento	15
3.2.2 Arena	16
3.2.3 Agregado pétreo	17
3.2.4 Escoria volcánica (tezontle)	17
3.2.5 Agua	18
3.2.6 Absorción del agua en el contenido grueso	18
3.3 Instrumentación	19
3.3.1 Prensa mecánica para compresión de cilindros	20
3.4 Cálculo de materiales por el método del ACI (ACI PRC-211.5-14, 2023)	21
3.4.1 Diseño de concreto por el método del ACI	21
Cálculo de resistencia promedio requerida	21
3.5 Diseño de mezcla	26
3.5.1 Diseño de mezcla de concreto hidráulico de cemento blanco con un $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$	27
3.5.2 Diseño de mezcla de concreto hidráulico con 25% y 100% de tezontle	29
3.5.3 Revenimiento	29
3.6 Elaboración de cilindros de concreto	30
3.7 Desmontaje y curado de cilindros	31
3.8 Ensayes de cilindros	32
3.9 Pruebas corrosión y oxidación en el concreto armado	34
3.9.1 Pruebas de oxidación del concreto armado	34
3.10 Evaluación económica	35
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1 Introducción	36
4.2 Propiedades del concreto modificado	36
4.2.1 Ensaye de cilindros a los 7 días de fraguado	36
Resistencia a la compresión	36

4.2.2 Ensaye de cilindros a los 14 días de fraguado	39
Resistencia a la compresión	39
4.2.3 Ensaye de cilindros a los 28 días de fraguado	41
Resistencia a la compresión	41
4.2.4 Promedio de ensaye de cilindros	42
4.3 Potencial de corrosión en concreto	43
4.4 Discusión de los resultados obtenidos	44
4.4.1 Densidad y peso del concreto	45
4.4.2 Resistencia del tezontle y el concreto modificado	45
4.5 Análisis de costo/beneficio del concreto modificado	45
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
5.1 Conclusiones	48
5.2 Recomendaciones	49
Referencias	51

Lista de tablas

	Página
Tabla 3.1 Ficha técnica cemento Cruz Azul (Secretaría de Economía, 2017)	16
Tabla 3.2 Propiedades físicas de la arena caliza (Secretaría de Economía, 2014)	17
Tabla 3.3 Propiedades físicas del agregado pétreo (Secretaría de Economía, 2014)	17
Tabla 3.4 Propiedades físicas del tezontle (Secretaría de Economía, 2014)	18
Tabla 3.5 Lista de materiales para ensaye de cilindros	20
Tabla 3.6 Ficha técnica de prensa hidráulica (Prensa de Compresión PILOT C-34C02 – Serviam, 2023)	21
Tabla 3.7 Datos de diseño de mezcla de $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$	28
Tabla 4.1 Resultados del ensaye de cilindros a los 7 días de curado	37
Tabla 4.2 Resultados del ensaye de cilindros a los 14 días de fraguado	39
Tabla 4.3 Resultados del ensaye de cilindros a los 28 días de fraguado	41

Lista de figuras

	Página
Figura 3.1 Prensa Hidráulica CONTROLS	20
Figura 3.2 Preparación de la superficie de trabajo	27
Figura 3.3 Elaboración de la mezcla de concreto. a) Cribado y limpieza de grava, b) Mezcla de arena, grava y cemento, c) Adición de agua a la mezcla	28
Figura 3.4 Elaboración del concreto modificado. a) Agregado de tezontle al 25% y 100% de la mezcla, b) adición del agua a la mezcla	29
Figura 3.5 Golpeo de la mezcla y determinación del revenimiento	30
Figura 3.6 Proceso de llenado de los cilindros. a) Revisión del molde del cilindro, b) Llenado de cilindros de concreto, c) Evidencia de etiquetado del cilindro	30
Figura 3.7 Preparación de los especímenes para la etapa de curado. a) Desmontaje de especímenes, b) Preparación de agua para curado, c) marcado de cilindros	31
Figura 3.8 Curado de concreto y almacenamiento de especímenes	32
Figura 3.9 Extracción del espécimen, proceso de pesado en báscula y separación de los cabezales de neopreno de los cilindros	33
Figura 3.10 Obtención de la resistencia a la compresión. a) Colocación del cabezal de neopreno, b) Colocación del cilindro en la prensa, c) Falla del espécimen	33
Figura 3.11 Molde de especímenes de pruebas de corrosión y oxidación	34
Figura 4.1 Relación peso/resistencia de los cilindros: a) generales y b) promedio	38
Figura 4.2 Relación de peso/resistencia de cada cilindro a 14 días de fraguado: a) generales y b) promedio	40
Figura 4.3 Relación de peso y resistencia de cada cilindro a 28 días de fraguado: a) generales y b) promedio	42
Figura 4.4 Especímenes de concreto con distintos porcentajes de tezontle (0%, 25%, y 100%) como agregado grueso, expuestos a un medio corrosivo con una concentración de 3.5% de NaCl y en función del tiempo	44

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El empleo del concreto con cemento Portland tuvo sus inicios en el siglo XIX y su adopción se incrementó notablemente debido a su aumento en la resistencia (Pérez, 2013). Los componentes fundamentales del concreto consisten en una mezcla de cemento, agua, grava y arena, los cuales al solidificarse forman un material sólido de uso extendido en el ámbito de la construcción (Revista Construye, 2022). Este material, que solo requiere agua durante la mezcla para endurecerse, puede ser utilizado incluso bajo el agua (American Concrete Institute ACI, 2015). Al ser vertido en un molde o encofrado, el concreto puede adquirir casi cualquier forma y transformarse en elementos prefabricados para la construcción. Especialmente cuando se mezcla con materiales de relleno y alta dureza, el concreto proporciona una base sólida para estructuras edificadas (Tovar, 2023).

La historia del concreto es milenaria y a lo largo del tiempo, su utilización ha sido perfeccionada. Grandes obras de vivienda e infraestructura que han marcado momentos cruciales en la historia humana se han construido con este material, el cual, más que un simple descubrimiento, se ha convertido en un auténtico motor de desarrollo para la humanidad (uDocz, 2021). Según diversas investigaciones, los vestigios más antiguos conocidos sobre el uso de mezclas cementantes se remontan a los años 7000 y 6000 a.C., cuando se encontraron evidencias de los primeros pisos de concreto elaborados a partir de calizas calcinadas en regiones como Israel y la antigua Yugoslavia, respectivamente (uDocz, 2021).

1.1.1 Uso del concreto en diferentes etapas de la humanidad

A lo largo de la historia, la humanidad ha recurrido a una amplia gama de materiales para erigir estructuras duraderas y funcionales. Entre estos, el concreto se destaca como uno de los materiales más versátiles y ampliamente empleados en la construcción. Desde las antiguas civilizaciones hasta la era moderna, el concreto ha desempeñado un papel fundamental en el progreso y desarrollo de la civilización.

Usos del concreto en las antiguas civilizaciones

En las antiguas civilizaciones, como la egipcia y la romana, el concreto desempeñó un papel fundamental en la construcción de monumentos y estructuras duraderas. Según Smith (2010), los egipcios utilizaron una forma primitiva de concreto para construir las pirámides de Giza. Este concreto se mezclaba con piedra caliza y agua, creando una masa densa que se solidificaba con el tiempo. De manera similar, los romanos utilizaron el concreto en la construcción de acueductos,

puentes y edificios, aprovechando las propiedades de durabilidad y resistencia del material (Johnson, 2012).

El concreto en la revolución industrial

Durante la revolución industrial, el uso del concreto experimentó un crecimiento significativo debido a los avances tecnológicos y la creciente demanda de infraestructuras. En este período, se introdujeron diferentes tipos de cemento y técnicas de mezcla que mejoraron la calidad y las propiedades del concreto (Brown, 2015). La invención del cemento Portland, en particular, revolucionó la industria de la construcción al permitir la producción de concreto de alta resistencia y durabilidad (Miller, 2018).

Funciones del concreto en la actualidad

En la actualidad, el concreto sigue siendo uno de los materiales de construcción más utilizados en todo el mundo, debido a sus diversas funciones y beneficios. El concreto se utiliza en la construcción de viviendas, edificios comerciales, infraestructuras y obras públicas. Su resistencia, durabilidad y capacidad de adaptación a diferentes formas y diseños lo convierten en una elección popular (Jones, 2020). Además, el concreto ofrece una excelente resistencia al fuego y a los desastres naturales, lo que lo convierte en un material seguro y confiable (Smith, 2019).

A lo largo de la historia, el concreto ha desempeñado un papel crucial en la construcción de estructuras duraderas y funcionales. Desde las antiguas civilizaciones hasta la era moderna, el concreto ha sido utilizado de diferentes formas, demostrando su versatilidad y adaptabilidad. Hoy en día, el concreto continúa siendo un material de construcción fundamental, utilizado en una amplia gama de proyectos debido a sus propiedades únicas y beneficios. Su resistencia, durabilidad y capacidad de resistir desastres naturales lo convierten en una opción preferida en la industria de la construcción.

1.1.2 Modificaciones en el concreto a través de la historia

El concreto es un material de construcción ampliamente utilizado debido a su resistencia, durabilidad y versatilidad. Sin embargo, a lo largo de los años, se han realizado numerosas modificaciones en los componentes del concreto para mejorar aún más sus propiedades y adaptarlo a diferentes necesidades de construcción.

Modificaciones en el cemento

El cemento es el componente clave del concreto y desempeña un papel crucial en sus propiedades. Para mejorar el concreto, se han realizado modificaciones en el tipo y contenido de cemento utilizado. Según García, Rodríguez y Robles (2018), el uso de aditivos en el cemento, como los

superplastificantes y los retardantes de fraguado, ha demostrado mejorar la trabajabilidad y el tiempo de fraguado del concreto. Asimismo, la incorporación de materiales cementantes suplementarios, como las cenizas volantes y la escoria de alto horno, ha demostrado mejorar la resistencia y la durabilidad del concreto (Chindapasirt, Rukzon y Sirivivatnanon, 2017).

Modificaciones en los agregados

Los agregados, como la arena y la grava, también pueden ser modificados para mejorar las propiedades del concreto. La utilización de agregados ligeros, como las perlitas expandidas y las cenizas volantes, ha demostrado reducir la densidad del concreto y mejorar su resistencia al fuego (Güneyisi, Gesoğlu, Mermerdaş y Gencil, 2021). Además, la selección de agregados de alta calidad y la optimización de su granulometría pueden mejorar la resistencia mecánica y la durabilidad del concreto (Dehwah, Nadjai y Magee, 2019).

Modificaciones en los aditivos

Los aditivos son componentes clave en la modificación del concreto, ya que permiten mejorar diversas propiedades y características. Los superplastificantes, por ejemplo, se utilizan para mejorar la trabajabilidad del concreto sin comprometer su resistencia (Mehta, 2014). Los aditivos reductores de agua, por otro lado, permiten reducir la cantidad de agua de mezcla necesaria, mejorando la resistencia y la durabilidad del concreto (Khayat, 2016). Asimismo, los aditivos acelerantes y retardantes de fraguado se utilizan para controlar el tiempo de fraguado del concreto según las necesidades de la construcción (Müller, 2018).

A través de las modificaciones realizadas en los componentes del concreto, se han logrado mejoras significativas en sus propiedades y rendimiento. La modificación del cemento, los agregados y los aditivos ha permitido adaptar el concreto a diferentes requisitos de construcción, mejorando su trabajabilidad, resistencia, durabilidad y otras propiedades clave.

La principal característica estructural del concreto es su notable resistencia a los esfuerzos de compresión, pero no tiene buen comportamiento frente a otros tipos de esfuerzos (tracción, flexión, cortante, etc.), y por este motivo es habitual usarlo asociado a ciertas armaduras de acero, recibiendo en este caso la denominación de concreto armado (Gobierno de la CDMX, 2020). Este material se comporta muy favorablemente ante las diversas sollicitaciones o esfuerzos mencionados anteriormente. Cuando se proyecta una estructura de concreto armado se establecen las dimensiones de los elementos, el tipo de concreto, los aditivos y el acero que hay que colocar en función de los esfuerzos que deberá soportar y de las condiciones ambientales a que estará expuesto (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2019).

El concreto ligero es un material cuyo origen se remonta desde hace varios siglos. Los romanos en el año 27 a. C. usaron una forma de concreto ligero en la construcción de la cúpula del Panteón de 44 m de diámetro, en el cual utilizaron piedra pómez como agregado (Panteón de Agripa de Roma, 2019). Más recientemente, a finales del siglo XIX se inició el uso de un concreto con agregados de escoria de hulla en Estados Unidos y Europa (Pérez, 2013). A mediados de la década de los treinta, se introdujo en Europa la escoria espumosa de los altos hornos, indicándose su uso como agregado ligero (Rivera-Villareal, 2001). La utilización principal de estos concretos ligeros era en la fabricación de bloques para muros no estructurales; más tarde se mejoró la calidad del concreto fabricado con agregados de esta escoria y se pudo utilizar para elementos de carga (Rivera-Villareal, 2001).

1.2 Planteamiento del problema

La auto construcción es un fenómeno extendido en México, donde muchas personas construyen sus viviendas utilizando sus propios recursos y habilidades. Esta práctica se ha convertido en una forma de acceder a la vivienda de manera económica y adaptada a las necesidades de cada familia. No obstante, se carece de una cifra exacta de la población en México que se dedica o realiza dicha práctica, pero de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), existe un estudio donde se muestran los Estados que más contratan empresas constructoras y además el desarrollo que tienen; por ende, los Estados de la República menos desarrollados son los que menos recurren al servicio de una construcción profesional (INEGI, 2018). En el centro de México, específicamente en la zona del Cinturón Volcánico Mexicano, los recursos naturales disponibles como las escorias volcánicas, han desempeñado un papel importante en la auto construcción y la construcción en general.

En el centro de México, donde se encuentran importantes volcanes como el Popocatepetl e Iztaccíhuatl, las escorias volcánicas son abundantes. Estas escorias, resultado de las erupciones volcánicas pasadas, se caracterizan por su ligereza y capacidad de aislamiento térmico (Trejo-Téllez, Ramírez-Martínez, Gómez-Merino, García-Alvarado, Baca-Castillo y Tejeda-Sartorius, 2013). Debido a estas propiedades, las escorias volcánicas se han utilizado tradicionalmente como agregados en la construcción de viviendas en la región centro del país.

La auto construcción en México se basa en el uso de materiales disponibles localmente, y las escorias volcánicas se han convertido en una opción atractiva debido a su fácil accesibilidad y bajo costo. Estas escorias se utilizan como agregados en la mezcla de concreto y en la fabricación de bloques de construcción (Johnson, 2012). El concreto elaborado con escorias volcánicas como agregados

muestra propiedades favorables, como una menor densidad, una mayor resistencia térmica y una mejor capacidad de aislamiento acústico en comparación con el concreto convencional (Jones, 2020).

Además de las propiedades técnicas favorables, el uso de escorias volcánicas en la auto construcción en México también tiene un impacto positivo desde una perspectiva ambiental. Al aprovechar los recursos naturales locales, se reduce la dependencia de materiales importados y se disminuye la huella de carbono asociada con su transporte (Smith, 2019). El uso de escorias volcánicas (entre ellas el tezontle) como agregados contribuye a la reducción de los residuos generados por las actividades volcánicas pasadas.

Pero en México, la búsqueda de tezontle puede presentar diversas dificultades debido a varios factores:

1. Ubicación geográfica limitada: El tezontle se encuentra principalmente en ciertas regiones del país, como el Valle de México y algunas áreas cercanas a volcanes activos o extintos. Esto limita la disponibilidad de este material en otras partes de México, lo que puede aumentar los costos de transporte si se necesita en lugares distantes (Venta de tezontle en CDMX, 2020).
2. Dependencia de la actividad volcánica: La formación natural del tezontle está vinculada a la actividad volcánica. Como resultado, su disponibilidad puede verse afectada por la falta de erupciones recientes o cambios en la actividad volcánica, lo que puede hacer que sea más difícil de encontrar en ciertos momentos (De occidente, 2020).
3. Competencia por el recurso: Debido a su versatilidad y utilidad en la construcción, el tezontle puede ser un recurso muy buscado. Esto puede llevar a una competencia intensa por el acceso a las canteras o sitios de extracción de tezontle, lo que aumenta la dificultad de encontrarlo y, en algunos casos, puede generar conflictos sociales.
4. Regulaciones ambientales: Su extracción está sujeta a regulaciones ambientales y de conservación. Las restricciones destinadas a proteger el entorno natural y evitar la sobreexplotación pueden limitar la disponibilidad y cantidad que se puede extraer legalmente (De Ensenada, 2018)
5. Calidad variable: Su calidad puede variar de una ubicación a otra, e incluso dentro de una misma cantera. Esto significa que encontrar tezontle con las características específicas necesarias para ciertas aplicaciones puede ser un desafío.
6. Costos de extracción y transporte: Dependiendo de la ubicación de las canteras de tezontle y de la distancia a la que se encuentren de los proyectos de construcción, los costos de

extracción y transporte pueden ser significativos. Esto puede hacer que el tezontle sea una opción más costosa en comparación con otros materiales locales (Venta de tezontle en CDMX, 2020).

Encontrar tezontle en México puede ser difícil debido a su ubicación geográfica limitada, la competencia por el recurso, las regulaciones ambientales y la variabilidad en la calidad. A pesar de estas dificultades, el tezontle sigue siendo un material valioso en la construcción y la arquitectura mexicana debido a sus propiedades únicas y su belleza estética (De Ensenada, 2018).

La auto construcción en México, particularmente en el centro del país, ha encontrado en los recursos naturales disponibles, como las escorias volcánicas, una solución sostenible y económicamente viable para la construcción de viviendas. Aunque con sus dificultades antes mencionadas, estos materiales ofrecen propiedades técnicas favorables y contribuyen a la reducción del impacto ambiental. Su utilización como agregados en el concreto es un ejemplo de cómo la auto construcción puede aprovechar los recursos locales para satisfacer las necesidades de vivienda de la población, promoviendo al mismo tiempo la sostenibilidad y la resiliencia en la construcción.

1.3 Justificación

Debido a lo anterior, así como a la disponibilidad de escorias volcánicas en regiones del estado de Hidalgo, en este trabajo se explora el empleo del tezontle en sustitución de agregados gruesos para obtener un concreto más ligero que el concreto común para uso estructural.

El concreto representa uno de los materiales fundamentales que otorgan resistencia a las estructuras. Mejorar sus propiedades físicas se presenta como una opción viable para lograr estructuras resistentes y más livianas, lo que conlleva a menores demandas en las cimentaciones. Esta reducción de peso del concreto no solo disminuye las cargas, sino que también reduce los costos al permitir la construcción de elementos más pequeños o con menor capacidad, ya que no están sometidos a cargas tan pesadas. El Ingeniero Raymundo Rivera Villarreal ha investigado modificaciones similares a las que se proponen (Rivera-Villareal, 2001). Un ejemplo de estas alteraciones es la creación de concreto liviano prescindiendo de agregados finos y sustituyendo el agregado grueso por piedra pómez (Rivera-Villareal, 2001).

Por consiguiente, tomando en cuenta la disponibilidad de escorias volcánicas en ciertas áreas del estado de Hidalgo, esta investigación explora la viabilidad de emplear tezontle como reemplazo de los agregados gruesos, con el propósito de obtener un tipo de concreto más ligero que el convencional, apto para su uso en aplicaciones estructurales.

1.4 Hipótesis

En este trabajo se obtiene un concreto ligero, partiendo de sustituir el agregado grueso (grava triturada) en distintas proporciones por grava roja de tezontle, que sea apto para utilizarlo en estructuras y/o elementos estructurales, diseñadas a base de concreto armado. Se establece el porcentaje de sustitución idóneo para obtener un concreto con características similares.

1.5 Objetivo general

Diseñar y analizar un concreto estructural ligero, sustituyendo parcialmente el agregado grueso por gravas de tezontle, para obtener resistencias similares, pero con menor densidad. Además, el concreto estructural armado se someterá a pruebas de oxidación y corrosión para evaluar si presenta problemas de absorción y humedad interna que afecten sus propiedades mecánicas.

1.5.1 Objetivos específicos

- Analizar un concreto modificado con sustitución de agregados gruesos por 100% y 25% de gravas de tezontle para obtener un concreto estructural ligero.
- Comparar las características físicas y mecánicas de un concreto estructural común respecto al concreto modificado para verificar si los resultados son similares y determinar qué porcentaje de sustitución es el adecuado.
- Evaluar mediante pruebas de oxidación y corrosión para determinar si el concreto modificado armado presenta problemas de infiltración de agua que afecten su vida útil.
- Determinar las consideraciones adicionales necesarias para obtener un concreto ligero con gravas de tezontle que cumpla con los criterios establecidos por la normativa correspondiente.
- Evaluar la viabilidad económica de la sustitución de agregados de tezontle en el concreto modificado para determinar si es competitivo respecto al concreto común.

1.6 Metas

- Aportación al conocimiento en el diseño de concretos estructurales para elementos de concreto armado modificados con materiales locales disponibles.
- Comparar las características físicas y mecánicas del concreto estructural con agregados naturales y el concreto modificado con agregados de tezontle, por medio de la descripción de cantidades específicas y de pruebas en laboratorio.

- Ofrecer una alternativa para emplear diversos materiales en el diseño de concretos estructurales que disminuyan el consumo de gravas de río y trituradas, desde los aspectos técnicos y económicos.

1.7 Alcances y limitaciones

El alcance del proyecto consiste en crear un concreto estructural ligero sin afectar las características principales de un concreto normal. Se espera que el concreto modificado obtenga una resistencia similar, pero con una menor densidad. También, se evalúa su viabilidad económica respecto al concreto con agregados naturales disponibles.

Como limitaciones, se puede mencionar que únicamente se evalúan propiedades físicas como la densidad y la resistencia a la compresión, así como su comportamiento a la oxidación y corrosión. En este trabajo no se evalúa el impacto ambiental ni otras propiedades mecánicas comúnmente determinadas en los concretos.

1.8 Objeto de estudio

El concreto ligero común y el modificado se diseñan para una resistencia óptima de 250 kg/cm², ya que, de acuerdo con los trabajos que se realizan dentro de la ingeniería civil, es la resistencia más común en la construcción, debido a que no es una resistencia a la cual sea difícil de llegar y tampoco genera costos excesivos en los materiales (ASTM, 2009).

El material sustituto de la grava triturada es grava roja de tezontle en proporciones del 100% y 25%. Se diseña la mezcla de acuerdo con las normas de concreto NMX-C-414-ONNCCE-2014 (Secretaría de Economía, 2017) y el método de diseño de concreto del ACI 211 (American Concrete Institute ACI, 2019). Después de determinar qué proporciones de sustitución son las adecuadas en el concreto modificado, se elaboran especímenes de concreto con acero, para someterlos a pruebas de oxidación y corrosión.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción

El concreto ligero es un material ampliamente utilizado en la construcción debido a su baja densidad, alta resistencia y propiedades aislantes. Este tipo de concreto se caracteriza por tener una densidad menor a 2200 kg/m^3 y una resistencia a la compresión que oscila entre los 14 y 42 MPa (Zeyad, Johari, Tayeh y Yusuf, 2016). Las aplicaciones más comunes de este material son en la construcción de estructuras de carga reducida, elementos arquitectónicos y elementos prefabricados.

El concreto es uno de los materiales más utilizados en la construcción debido a su resistencia y durabilidad. La composición del concreto incluye cemento, agregados y agua, siendo el agregado grueso el responsable de proporcionar la resistencia mecánica al material. Sin embargo, en los últimos años se ha investigado la posibilidad de sustituir el agregado grueso por materiales más ligeros, como las escorias volcánicas, con el objetivo de obtener un concreto más liviano y resistente al mismo tiempo (Aragón, Sánchez, López y Pacheco, 2015). La incorporación de escorias volcánicas en la mezcla de concreto puede mejorar sus propiedades, ya que estas son ligeras y tienen una granulometría adecuada para actuar como sustituto del agregado grueso (Al-Swaidani, 2012).

El concreto ligero es una opción atractiva para la construcción debido a su bajo peso y alta resistencia mecánica. La incorporación de escorias volcánicas en la mezcla de concreto puede mejorar sus propiedades, ya que estas son ligeras y tienen una granulometría adecuada para actuar como sustituto del agregado grueso (Al-Swaidani, 2012).

2.2 Normativa para el diseño de un concreto ligero

En México, para diseñar un concreto ligero se debe seguir la Norma Mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2016 "Concreto ligero: especificaciones y métodos de prueba," emitida por la Secretaría de Economía a través de la Dirección General de Normas (Secretaría de Economía, 2016). Según esta norma, el concreto ligero se define como aquel con una densidad aparente seca menor a 2000 kg/m^3 . También, la NMX-C-404-ONNCCE-2016 establece los requisitos para el "Diseño, fabricación y uso de concreto ligero, así como los métodos de prueba para evaluar las características del material." En el diseño del concreto ligero, se deben considerar factores como la densidad deseada, la resistencia a la compresión requerida, la dosificación de los materiales, la relación agua-cemento y otros factores específicos del proyecto (Secretaría de Economía, 2016).

Es importante destacar que el diseño y la fabricación de concreto ligero deben realizarse por personal calificado y con experiencia en la producción de este tipo de materiales. Además, se deben seguir las normas de seguridad establecidas para el manejo de materiales y equipos utilizados en la fabricación del concreto (Secretaría de Economía, 2016).

2.3 Escorias volcánicas

Las escorias volcánicas son un tipo de material natural que se produce durante las erupciones volcánicas. Se caracterizan por ser un material ligero y poroso, con una textura porosa y una superficie áspera. Según estudios previos, las escorias volcánicas tienen una baja densidad aparente de 1330 kg/m^3 en comparación con la grava triturada, que es de 2700 kg/m^3 , es un 50.75% menor y además tiene una porosidad elevada, lo que les confiere una buena capacidad de aislamiento térmico y acústico (López, Torres-Castillo y Burciaga-Díaz, 2019). Además, tienen una alta resistencia al fuego y al desgaste, lo que los convierte en un material atractivo para su uso en la construcción (Cruz, Robles y Cervantes, 2017).

En cuanto a sus propiedades mecánicas, las escorias volcánicas presentan de un 15% a un 30% menor resistencia a la compresión y a la tracción, debido a su estructura porosa. Sin embargo, se ha demostrado que la adición de cemento y otros aditivos puede mejorar significativamente su resistencia mecánica (López, Torres-Castillo y Burciaga-Díaz, 2019).

En resumen, las escorias volcánicas son un material natural con características y propiedades únicas que lo hacen adecuado para su uso en la construcción. Su porosidad y baja densidad les confieren una buena capacidad de aislamiento térmico y acústico, mientras que su alta resistencia al fuego y al desgaste lo hacen atractivo para su uso en aplicaciones estructurales.

2.4 Incorporación de escorias volcánicas en el concreto

El concreto ligero se ha convertido en una alternativa cada vez más popular en la construcción debido a sus propiedades específicas, tales como su baja densidad que es de 1330 kg/m^3 y su capacidad de soportar cargas elevadas que se ve afectada hasta en un 30% (Secretaría de Economía, 2016). Una de las formas de producir concreto ligero es mediante la sustitución del agregado grueso convencional por un material más liviano, como el tezontle (un tipo de escoria volcánica).

La incorporación de escorias volcánicas en el concreto es un área de investigación en la que se busca mejorar las propiedades del concreto utilizando este tipo de material como sustituto parcial o total del

agregado grueso convencional. Y para un mejor manejo y estudio, en este trabajo se desarrollará un análisis donde se sustituirá el agregado grueso (grava triturada) por tezontle en los siguientes porcentajes: 25% y 100% del agregado grueso. Y a su vez, este concreto modificado será comparado con un concreto convencional. Cabe mencionar que el concreto se diseñará para obtener un $f'c$ de 250kg/cm^2 ya que esta es una de las resistencias más comunes a utilizarse en la construcción (Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno de la Ciudad de México, 2017).

Según estudios previos, la incorporación de escorias volcánicas en el concreto puede resultar en una disminución de la densidad del concreto y en un aumento de su capacidad de aislamiento térmico y acústico (López, Torres-Castillo y Burciaga-Díaz, 2019). Además, se ha demostrado que la adición de escorias volcánicas al concreto puede mejorar su resistencia al fuego y al desgaste (Cruz, Robles y Cervantes, 2017). En cuanto a las propiedades mecánicas, la incorporación de escorias volcánicas en el concreto puede afectar su resistencia a la compresión y a la tracción. Sin embargo, se ha encontrado que la adición de otros aditivos y la optimización de la dosificación pueden mejorar significativamente la resistencia mecánica del concreto con escorias volcánicas (López, Torres-Castillo y Burciaga-Díaz, 2019).

En general, la incorporación de tezontle en el concreto es una técnica que puede mejorar las propiedades del concreto, como su capacidad de aislamiento y su resistencia al fuego y al desgaste. Aunque la incorporación de tezontle puede afectar la resistencia mecánica del concreto, la dosificación adecuada y la adición de otros aditivos pueden mejorar significativamente la resistencia mecánica del concreto con tezontle.

2.5 Consideraciones sobre el uso del tezontle en concretos

La producción del concreto ligero con escorias volcánicas se lleva a cabo mediante el reemplazo total o parcial del agregado grueso convencional por escorias volcánicas. El proceso de producción consiste en la selección y clasificación de las escorias volcánicas, su trituración y tamizado, para obtener el tamaño de partícula adecuado y la mezcla con los demás componentes del concreto, como el cemento, agregado fino y aditivos (Ituza-Revilla y Ticona-Huilca, 2019).

Según estudios previos, la sustitución del agregado grueso por tezontle en el concreto puede resultar en una reducción significativa en su densidad sin comprometer su resistencia mecánica (López, Torres-Castillo y Burciaga-Díaz, 2016). Además, se ha demostrado que el tezontle puede mejorar la capacidad de aislamiento térmico del concreto, lo que lo convierte en una opción atractiva para aplicaciones en climas cálidos (García, Rodríguez y Robles, 2018).

La metodología para la incorporación de tezontle al concreto es un proceso que se puede llevar a cabo siguiendo un conjunto de pasos específicos. Según trabajos previos (Secretaría de Economía, 2016), se pueden seguir los siguientes procedimientos para una correcta ejecución:

1. Selección y caracterización del tezontle: es necesario seleccionar el tezontle adecuado para la mezcla, caracterizarlo en cuanto a su densidad (1330 kg/m^3), absorción de agua de 7.5% y tamaño de partícula aproximadamente menor a 5/8 pulgadas.
2. Preparación de la mezcla: se debe determinar la cantidad de tezontle que se utilizará en la mezcla, así como la cantidad de otros componentes como cemento, arena y agua. Es importante considerar la dosificación adecuada para obtener una mezcla homogénea.
3. Mezclado: se recomienda el uso de una mezcladora concretera para mezclar adecuadamente los materiales. Es importante asegurar una mezcla uniforme para lograr una calidad óptima del concreto.
4. Moldeado: se deben preparar moldes adecuados para la forma y tamaño deseado del concreto. Es importante tener en cuenta que la densidad y resistencia del concreto pueden variar según el tipo de molde utilizado.
5. Curado: se debe proporcionar un adecuado curado al concreto para asegurar su resistencia y durabilidad. El tiempo y la temperatura de curado dependerán de la dosificación y el tipo de tezontle utilizado.

La metodología para la incorporación de tezontle al concreto incluye la selección y caracterización del tezontle, la preparación de la mezcla, el mezclado adecuado, el moldeado y el curado. Estos pasos son importantes para asegurar la calidad del concreto y maximizar las propiedades del tezontle en la mezcla.

2.6 Desventajas al usar escorias volcánicas en el concreto

Es importante destacar que la sustitución del agregado grueso por escorias volcánicas en la fabricación de concreto ligero puede afectar su durabilidad. Según estudios realizados por Vilca-Olivera (2022), la porosidad de las escorias volcánicas puede afectar la durabilidad del concreto a largo plazo, ya que puede permitir la entrada de agua y otros agentes agresivos en el material.

Aunque la incorporación de escorias volcánicas al concreto presenta diversas ventajas, también existen algunas desventajas que deben ser consideradas. Entre las principales desventajas se encuentran (Ituza-Revilla y Ticona-Huilca, 2019):

- Mayor porosidad: la porosidad del concreto puede aumentar con la incorporación de escorias volcánicas, lo que puede afectar negativamente la durabilidad del concreto a largo plazo.
- Variabilidad en las propiedades: la calidad y las propiedades de las escorias volcánicas pueden variar significativamente, lo que puede afectar la calidad y la consistencia del concreto.
- Baja resistencia al fuego: algunos estudios han demostrado que el concreto que contiene escorias volcánicas puede tener una resistencia al fuego menor que el concreto convencional.
- Baja resistencia a la abrasión: el concreto con escorias volcánicas puede tener una resistencia a la abrasión menor que el concreto convencional, lo que puede limitar su uso en ciertas aplicaciones.
- Costos más elevados: el costo de las escorias volcánicas puede ser más elevado que otros materiales, lo que puede afectar la viabilidad económica de su uso en algunas aplicaciones.

Es importante tener en cuenta estas desventajas al considerar la incorporación de escorias volcánicas en el concreto, y evaluar cuidadosamente si los beneficios superan las posibles limitaciones.

2.7 Normativa para concretos diseñados con escorias volcánicas

Para el diseño de concreto ligero en México utilizando escorias volcánicas como agregado, se puede seguir la Norma Mexicana NMX-C-212-ONNCCE-2017 "Industria de la construcción - Cemento con adiciones - Especificaciones y métodos de prueba" emitida por la Secretaría de Economía a través de la Dirección General de Normas (Secretaría de Economía, 2017). Esta norma establece los requisitos y especificaciones para el cemento con adiciones, incluyendo la utilización de escorias como adición mineral. Según esta norma, las escorias deben cumplir con ciertos requisitos físicos y químicos para poder ser utilizadas como agregado en el concreto (Secretaría de Economía, 2017).

Además, para el diseño de concreto ligero con escorias volcánicas, se pueden seguir las recomendaciones establecidas en la Norma Técnica Complementaria NTC-RCDF-2017 "Construcción de obras y edificaciones con materiales y sistemas sustentables en la Ciudad de México" emitida por la Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno de la Ciudad de México (Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno de la Ciudad de México, 2017). Esta norma establece las pautas para la construcción de edificaciones con materiales y sistemas sostenibles, incluyendo la utilización de agregados naturales y reciclados, como las escorias volcánicas. También, se establecen los requisitos para la dosificación de los materiales y la relación agua-cemento en el diseño del concreto ligero (Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno de la Ciudad de México, 2017).

Es importante destacar que el diseño y fabricación de concreto ligero con escorias volcánicas debe ser elaborado por personal calificado y con experiencia en la producción de este tipo de materiales. Además, se deben seguir las normas de seguridad establecidas para el manejo de materiales y equipos utilizados en la fabricación del concreto.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Introducción

A continuación, se describe la selección de los materiales y de los instrumentos que se utilizaron bajo lo establecido en la norma NMX-C404-ONNCCE-2016 (Asociación Mexicana de Normalización y Certificación, 2016), la cual describe los parámetros de diseño de una mezcla de concreto. Con esta norma se rigió la metodología de este trabajo, de tal manera que se pretende demostrar paso a paso, los acontecimientos que se presentaron a lo largo de los ensayos de los 27 cilindros que se elaboraron, así como los factores que se evaluaron dentro de los mismos.

En primer lugar, se realiza una descripción de los materiales, donde se especifican las cantidades que influyeron en el diseño de la mezcla y las propiedades de cada material (contenido de absorción en el agregado grueso). Posteriormente se mencionan qué instrumentos se ocuparon para realizar el concreto ligero.

Para el diseño de mezcla, se muestra la cantidad de los agregados con los que se diseñó el concreto convencional al igual que el concreto con un 25% y 100% de sustitución con escorias volcánicas (tezontle); además, se incluyen algunas observaciones del comportamiento de la mezcla, así como el momento donde se aumentaron las cantidades de algunos materiales.

Para la fabricación de los cilindros, únicamente se muestra bajo qué normativa se realizaron y cómo se fueron etiquetando las muestras. Por último, en el apartado del desmontaje de cilindros, se muestra el método del pesado de cada muestra, el tiempo de curado que tuvo cada espécimen y la manera de cómo se obtuvo la resistencia a la compresión ($f'c$) de dichas muestras. Todas las pruebas que se detallan en este capítulo se realizaron en los laboratorios de Mecánica de Suelos y Tecnología de Materiales, del Área Académica de Ingeniería y Arquitectura de esta Universidad.

3.2 Descripción de materiales

3.2.1 Cemento

De acuerdo con la cuantificación de los materiales para poder realizar los cilindros de concreto, se encontró que, para la fabricación de los 36 especímenes se requería de una cantidad de 63.0 kg totales de cemento; en este punto, bastó con conseguir un saco de cemento marca Cruz Azul de 50 kg, en el cual se define este material como un cemento Portland compuesto CPC 30 R RS según como lo establece la norma NMX-C-414-ONNCCE-2017 (Secretaría de Economía, 2017). Este

procedimiento se realizó con cemento en estado nuevo, a temperatura ambiente y resguardado de los rayos del sol. A continuación, en la tabla 3.1 se muestran las especificaciones técnicas de este material, y una breve comparativa con lo que dicta la norma (Secretaría de Economía, 2017) que indica la calidad de los materiales cementantes hidráulicos.

Tabla 3.1 Ficha técnica cemento Cruz Azul (Secretaría de Economía, 2017)

FICHA TÉCNICA		
Tipo de cemento:	Cemento Portland Compuesto CPC 30 R RS	
Análisis químico	NMX-C-414-ONNCCE	RESULTADOS
SO ₃ (%)	4.0 máx.	2.84
Pruebas físicas		
Blaine (cm ² /g)		4390
% Ret. tamiz 325 (45µm)	2.88	
Sanidad (%)		
Expansión	0.80 máx.	0.01
Contracción	2.20 máx.	-
Tiempo de fraguado Vicat (minutos)		
Inicial	45 min	160
Final	600 máx.	245
Resistencia a la compresión (N/MM²)		
1 día	-	16.1
3 días	20 min.	25.5
7 días	-	29.5
28 días	30-50	29.679
Expansión por ataques de sulfatos (1 año)		
Mes de referencia: DIC-2018	0.10% máx.	0.05

3.2.2 Arena

Para el agregado fino, se contó con una cantidad de 3.7 botes de 20 L, pedido de un banco de materiales ubicado en la zona de Mineral de la Reforma. La arena se utilizó de forma granular,

siguiendo los parámetros de la norma NMX-C-486-ONNCCE 2014 (Secretaría de Economía, 2014), que indica que este material debe clasificarse con el tamiz No. 04. Algunas propiedades físicas de la arena que se utilizó se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Propiedades físicas de la arena caliza (Secretaría de Economía, 2014)

FICHA TÉCNICA	
Características	
Peso específico	2.60 g/cm ³
Peso unitario	1,649.13 kg/m ³
Vacíos	35.82%
Absorción	1.75%
Pasa el tamiz No. 4	16.01%

3.2.3 Agregado pétreo

La grava triturada se pidió del mismo banco de materiales del que se extrajo la arena. Para este material, se utilizó la cantidad de 3.43 botes de 20L de capacidad. Las propiedades físicas de la grava se enlistan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Propiedades físicas del agregado pétreo (Secretaría de Economía, 2014)

FICHA TÉCNICA	
Características	
Peso específico relativo	2.60-2.70 t/m ³
Peso volumétrico sin compactar	1.45-1.50 t/m ³
Peso volumétrico compactado	1.45-1.60 t/m ³
Absorción	2.0% máx.
Pasa el tamiz No. 200	2.0%

3.2.4 Escoria volcánica (tezontle)

Este agregado se obtuvo de la región de Pachuquilla, en el municipio de Mineral de la Reforma, Hidalgo, ya que en ese lugar existen yacimientos de tezontle, dentro del estado de Hidalgo. Para el proyecto se requirió una cantidad de 2.45 botes de 20 L (tabla 3.4).

Tabla 3.4 Propiedades físicas del tezontle (Secretaría de Economía, 2014)

FICHA TÉCNICA	
Características	
Peso específico relativo	0.64-1.50 t/m ³
Peso volumétrico sin compactar	0.80-1.60 t/m ³
Peso volumétrico compactado	1.20–1.80 t/m ³
Absorción	5.0% máx.
Pasa el tamiz No. 200	2.0%

3.2.5 Agua

Este recurso se obtuvo dentro de las instalaciones del laboratorio ya que se cuenta con la toma de agua que abastece la red municipal de la región de Mineral de la Reforma estado de Hidalgo.

3.2.6 Absorción del agua en el contenido grueso

Dentro de este estudio fue necesario conocer el porcentaje de absorción de los agregados gruesos. Esta propiedad se enfocó en la comparativa de los agregados gruesos convencionales que se utilizan en la construcción (agregados pétreos) con la propuesta de sustituto de agregado de escorias volcánicas (tezontle). Este procedimiento se basó en la norma ASTM C 127-07 (*American Society for Testing and Materials*, ASTM C 127-07, 2017). Dicha norma describe el método para conocer la densidad, la densidad relativa, el peso específico y el contenido de absorción de los agregados gruesos en los materiales de la construcción.

Se obtuvieron muestras de 1 kg de gravas y de agregados de tezontle, siguiendo lo establecido en la norma ASTM D75 (Norma, N. T. P. 400.010 ASTM D 75, 2016) en la cual se establece el método de muestreo y el cernido de los agregados a través de un tamiz de 4.75 mm. Posteriormente, dicho material que se retuvo en la malla, se vació en un recipiente de alambre de 3.75 mm (tamiz No. 06). Después, el material se lavó con el fin de remover el polvo de su superficie. Este proceso se hizo para las dos muestras (grava y tezontle).

Una vez terminado el paso anterior, ambas muestras se sometieron a un secado mediante un horno cuya temperatura aproximada fue de 110 ± 5 °C. Cuando las muestras se sacaron del horno se dejaron a temperatura ambiente aproximadamente 3 h. Subsecuentemente, se sumergieron en un recipiente con agua en un lapso de 24 h. Transcurrido dicho periodo, se retiraron los agregados y se colocaron

sobre una superficie para la eliminación del exceso de humedad, con el fin de disolver las películas de agua que puedan llegar a tener.

Una vez que las muestras se encontraban saturadas, se realizó el pesaje mediante una báscula digital marca REMO, modelo RM-1022A con capacidad de carga de 40 kg y una báscula de piso marca Domapier modelo LP7516 con capacidad de carga de 300 kg. Después de registrar los valores, las muestras se sometieron al secado en el horno y se volvió a pesar la masa de los agregados gruesos en su estado seco. Para el cálculo de la densidad relativa empleó la ecuación 3.1.

$$\rho_{Relativa} = \frac{Masa\ secada\ al\ horno}{masa\ seca\ saturada - masa\ aparente\ en\ agua} \quad (Ec. 3.1)$$

Donde:

ρ Relativa es la densidad relativa, en gramos

Masa secada al horno, en gramos

Masa saturada, en gramos

Masa aparente en agua, en gramos

Una vez obteniendo los datos, finalmente se calculó el porcentaje de absorción con la siguiente ecuación 3.2:

$$Absorcion\ \% = \left(\frac{Masa\ saturada - masa\ secada\ al\ horno}{masa\ secada\ al\ horno} \right) \times 100 \quad (Ec. 3.2)$$

Donde:

Masa secada al horno, en gramos

Masa saturada, en gramos

3.3 Instrumentación

Para la elaboración del diseño de la mezcla de este proyecto, se empleó el siguiente material que se enlista en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Lista de materiales para ensaye de cilindros

Lista de materiales
2 palas cuadradas
2 cucharones de fondo plano para toma de muestra de materiales
Tamiz de 1 pulgada (25.4 mm)
Fondo y tapa de tamiz
Cuchara de albañil
Báscula digital con capacidad de 40 kg
12 moldes de cilindro para concreto de 15 cm de Ø x 30 cm de largo
Cono de Abrams de 20 cm de Ø x 10 cm de Ø x 30 cm de largo
Varilla de punta de bala
Flexómetro de 8m
12 botes con capacidad de 19 L
Prensa mecánica para compresión de cilindros (Marca CONTROLS, modelo 50-C43C04)
Placas de neopreno

3.3.1 Prensa mecánica para compresión de cilindros

La prensa que se ocupó en este estudio para realizar los ensayos de los cilindros de concreto armado fue de la marca CONTROLS modelo 50-C43C04. Esta consiste de un marco de acero soldado rígido donde el asiento esférico permite la alineación libre inicial al contacto con el espécimen. Esta prensa está equipada con platos de 216 mm de diámetro hechos para cilindros de 150 mm x 320 mm y cubos hasta de 150 mm (Figura 3.1).



Figura 3.1 Prensa Hidráulica CONTROLS

Dentro de la tabla 3.6, se mencionan algunas especificaciones de esta máquina.

Tabla 3.6 Ficha técnica de prensa hidráulica (Prensa de Compresión PILOT C-34C02 – Serviam, 2023)

FICHA TÉCNICA	
Modelo	50-50-C43C04
Capacidad (KN)	2000
Dimensiones platos (mm)	216 (diámetro)
Recorrido pistón (mm)	50
Luz vertical máx. (mm)	375
Luz horizontal (mm)	350
Cubos (cm)	10.15
Cilindros de (cm)	15x30 y 16x32
Dimensiones totales (lxdxh) mm	875x440x1030

3.4 Cálculo de materiales por el método del ACI (ACI PRC-211.5-14, 2023)

3.4.1 Diseño de concreto por el método del ACI

Datos del proyecto:

Sol/Tipo =	1
$f'c$ =	250 (kg/cm ²)
Pe (Peso específico del cemento) =	3.15 (kg/cm ³)
Slump (Revenimiento requerido) =	4"
Pe Agua (Peso específico del agua) =	1000 kg

Agregados:

Datos	Arena	Grava	Tezontle
Perfil		Angular	Angular
Peso unitario suelto (kg/cm ³)	1660	1577	1200
Peso unitario compactado (kg/cm ³)	1770	1677	1500
Peso específico (kg/cm ³)	2750	2610	1200
Módulo de fineza	2.60	6.7	6.7
TMN (Tamaño máximo nominal)		1 1/2	1
% Absorción	5.70%	2.80%	5%
% w (Agua contenida)	2.50%	1.70%	1.70%

Cálculo de resistencia promedio requerida

- 1- Cuando no existen registros de ensaye de cilindros del mismo diseño de mezcla anteriores al actual, se usarán los siguientes datos:

$f'c$	$f'cr$
<210	$f'c + 70$
210 - 350	$f'c + 84$
>350	$f'c + 98$

$f'c$ = Resistencia a la compresión (kg/cm²)

$f'cr$ = Resistencia a la compresión promedio requerida (kg/cm²)

Para este estudio la $f'cr$ deseable es:

$f'cr=$	334
---------	-----

2- Contenido de aire

Tamaño máximo nominal del agregado grueso	Aire aspirado
3/8"	3.00%
1/2"	2.50%
3/4"	2.00%
1"	1.50%
1 1/2"	1.00%
2"	0.50%
3"	0.30%
4"	0.20%

En este estudio, el valor deseable es:

Aire=	1.00%
-------	-------

3- Contenido de agua

Volumen unitario de agua								
Agua en l/m ³ , para los tamaños máximos nominales de agregado grueso y consistencia indicados								
Concreto sin aire incorporado								
Asentamiento	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	-

Concreto con aire incorporado								
1" a 2"	181	175	168	160	150	142	122	107
3" a 4"	202	193	184	175	165	157	133	119
6" a 7"	216	205	197	184	174	166	154	-

En este estudio, el valor deseable es:

a =	181 (l/m ³)
-----	-------------------------

4- Relación agua – cemento

Relación agua/cemento por resistencia		
f'cr (kg/cm ²)	Relación agua/cemento en peso	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
150	0.80	0.71
200	0.70	0.61
250	0.62	0.53
300	0.55	0.46
350	0.48	0.40
400	0.43	
450	0.38	

Para obtener este valor, se hace una interpolación, debido a que el f'cr que se requiere no aparece en la tabla:

f'cr (kg/cm ²)	C. sin aire incorporado
300	0.55
334	0.502
350	0.48

5- Contenido de cemento

Para determinar el contenido de cemento necesario en la mezcla, se empleó la ecuación 3.3:

$$\frac{\text{Contenido de agua}}{\text{cemento}} = \text{Relacion Agua – cemento} \quad \text{Ec. (3.3)}$$

Cemento =	360.558	kg
Cemento =	7.21116	Bultos

6- Peso del agregado grueso

Peso del agregado grueso por unidad de volumen del concreto				
Volumen de agregado grueso, seco y compactado, por unidad de volumen del concreto, para diversos módulos de fineza (b/Bo)				
Tamaño máximo nominal del agregado grueso	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8"	0.5	0.48	0.46	0.44
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
1"	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"	0.76	0.74	0.72	0.70
2"	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	0.81	0.79	0.77	0.75
6"	0.87	0.85	0.83	0.81

El peso del agregado grueso se obtiene por medio de la ecuación 3.4:

$$Peso A. G. = \frac{b}{Bo} * Peso U. S. C.$$

Ec. (3.4)

- Peso A.G. = Peso del agregado grueso (kg)
- b/Bo = Relación del Tamaño máx. nominal del agregado y el módulo de fines del agregado fino
- Peso U. S. C. = Peso unitario seco compactado (kg/cm²)

Peso del A. G. =	1240.98
------------------	---------

7- Volumen absoluto

Cemento =	0.114	m ³
Agua =	0.181	m ³
Aire =	0.01	m ³
Volumen agregado grueso =	0.475	m ³
Volumen agregado fino =	0.22	m ³

SUMATORIA	0.78	m ³
-----------	------	----------------

8- Peso del agregado fino

Este peso se obtuvo por medio de la ecuación 3.5:

$$Peso\ del\ A.\ F. = (Vol.\ A.\ F.) * (Peso\ Específico\ A.\ F.)$$

Ec. (3.5)

- **Vol. A. F.**= Volumen del agregado fino (m³)
- **Peso Específico A. F.**= Peso Específico del agregado fino (kg/cm²)

Pes A.F. =	605
------------	-----

9- Presentación del diseño en estado seco. Material requerido sin considerar su % de humedad contenida en los agregados.

Cemento =	360.558	kg
Agua =	181	L
Aire =	1.00%	
Agregado grueso =	1240.98	kg
Agregado fino =	605	kg

10- Corrección por humedad de los agregados

Esta corrección se realizó conforme a la ecuación 3.6:

$$Correccion = Agregado * (%W + 1)$$

Ec. (3.6)

- Agregado = Valor en kg del agregado fino o grueso
- %w = Porcentaje de agua contenida en el agregado

Los valores obtenidos para este estudio son:

Agregado fino Corregido=	620.125 kg
Agregado grueso Corregido=	1262.077 kg

11- Aporte de agua a la mezcla

Este corresponde al porcentaje de agua que contienen los agregados y que se incluyen en la mezcla (ecuación 3.7):

$$Aporte = (%W - \%Absorción) * P. A.$$

Ec. (3.7)

- %W= Porcentaje de agua dentro del agregado
- % Absorción= Porcentaje de absorción de agua del agregado
- P. A. = Peso en kilogramos del agregado

A.f Agua=	-19.36
A.g Agua=	-13.651

SUMA	-33.011
------	---------

12- Agua efectiva

Este parámetro se calculó por medio de la ecuación 3.8:

$$Agua\ Efectiva = a - Aporte\ de\ agua$$

Ec. (3.8)

- a= Agua necesaria para el proyecto (L)
- Aporte de agua= Aporte de agua que dan los agregados a la mezcla

Agua efectiva=	214.011
----------------	---------

13- Proporcionamiento de diseño

	Cemento	A. fino	A. grueso	Agua
	360.56 kg	605.00 kg	1240.98 kg	214.01 L
Diseño=	1.00 kg	1.70 kg	3.50 kg	0.59 L

Todas las tablas e información incluidas en este apartado fueron extraídas de la norma de diseño de concreto del ACI (ACI PRC-211.5-14, 2023).

3.5 Diseño de mezcla

Se realizó el diseño de la mezcla del concreto, bajo lo establecido por la normativa del ACI (American Concrete Institute (2019), considerando la mezcla original y otra mezcla modificada sustituyendo con 25% y 100% a los agregados gruesos por tezontle. Para ello, se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

- Selección del revenimiento
- Selección del tamaño máximo nominal del agregado
- Cantidad de agua de mezclado y contenido de aire
- Selección de la relación agua/cemento
- Contenido de cemento
- Estimación del contenido de agregado grueso
- Estimación del contenido de arena

- Ajustes por humedad de los agregados

Como se muestra en la figura 3.2, se realizó la preparación del sitio donde se elaboró la mezcla; fue necesario humedecer la superficie vertiendo una cantidad de agua sobre ella y esparcirla por medios manuales.



Figura 3.2 Preparación de la superficie de trabajo

Una vez finalizada la preparación del sitio, se pesó el material según las cantidades que se calcularon previamente para la dosificación de un concreto estructural con un $f'c$ de diseño de 250 kg/cm^2 . Cabe resaltar que se optó por esta resistencia debido a que es la más empleada en una construcción, ya que, con base a las Normas Técnicas Complementarias del 2017 (Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno de la Ciudad de México, 2017), en su apartado de “Criterios y Acciones para el diseño y construcción de estructuras de concreto, cada elemento estructural como: losas, vigas, columnas y zapatas”, se considera una resistencia a la compresión ($f'c$) de 250 kg/cm^2 .

Se diseñaron cuatro mezclas considerando los datos de diseño que se muestran en la tabla 3.7; además, se tomó en cuenta un factor del 10% de desperdicio según lo indica la norma A.C.I. 211.1 (American Concrete Institute, 2019). En la siguiente tabla 3.6, se muestra cómo se organizó la información, mostrando el número del espécimen y el porcentaje de sustituto de agregado grueso propuesto:

Tabla 3.7 Datos de diseño de mezcla de $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$

DATOS DE DISEÑO	
Espécimen no:	% de sustitución
Material	Desperdicio en %
Agua	10%
Cemento	10%
Arena	10%
Tezontle	10%
Grava triturada	10%

3.5.1 Diseño de mezcla de concreto hidráulico de cemento blanco con un $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$

Para la elaboración del concreto al 0% de sustituto de agregado grueso (concreto regular), las cantidades que se emplearon son las que se muestran en cualquier dosificación convencional, ya que aún no se altera ninguno de sus elementos de diseño. Cada uno de los materiales se pesaron con la ayuda de la báscula digital. Posteriormente, se vertió en la superficie húmeda la grava, la arena y el cemento, donde, antes de mezclar el agua con los demás elementos, se revolvieron con la ayuda de la pala, para que, agregando el agua se lograra una homogeneización de materiales (Figura 3.3). Posteriormente, se determinó su absorción de agua, registrando la cantidad de agua que fue necesaria para obtener el mismo revenimiento que en el concreto regular.



Figura 3.3 Elaboración de la mezcla de concreto. a) Cribado y limpieza de grava, b) Mezcla de arena, grava y cemento, c) Adición de agua a la mezcla

Como dato final, una vez hecha la mezcla, esta se vació en tres moldes cilíndricos para su etiquetado. Esto se explicará con mayor detalle en el apartado 3.5 de este capítulo.

3.5.2 Diseño de mezcla de concreto hidráulico con 25% y 100% de tezontle

Como se realizó con el concreto regular, se pesaron todos los materiales vaciando en primer lugar el cemento, arena, grava y tezontle (en sustitución del 25% y 100% de la cantidad necesaria de gravas); al final se añadió el agua. Para elaborar estos cilindros se utilizó una variación del método empleado para elaborar el concreto regular, ya que, para evitar problemas de absorción, el tezontle se sumergió en agua antes de verterlo en la mezcla. Este agregado se dejó saturar durante 5 minutos o hasta que el material estaba completamente humedecido; después se retiró del agua y se escurrió el excedente para verterlo inmediatamente a la mezcla. Una vez hecho lo anterior, se adicionó el agua de diseño y se realizó la revoltura (figura 3.4).

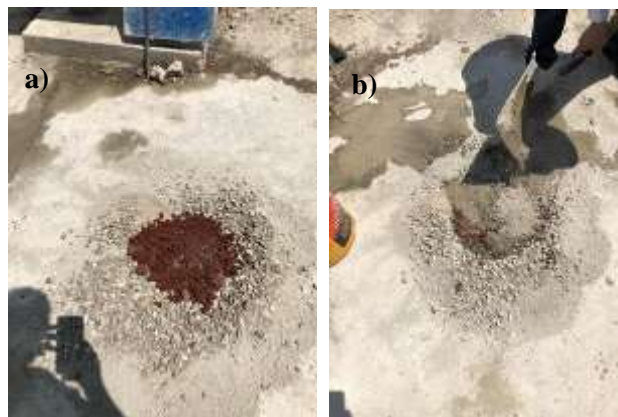


Figura 3.4 Elaboración del concreto modificado. a) Agregado de tezontle al 25% y 100% de la mezcla, b) adición del agua a la mezcla

3.5.3 Revenimiento

Antes de colocar la mezcla del concreto en los moldes de los cilindros, se realizó la prueba de revenimiento como lo dicta la norma NMX-C-156-ONNCCE-2010 (Secretaría de Economía, 2010). Para cada muestra según los tipos de mezcla empleados, se introdujo en el cono de Abrams a 1/3 de su capacidad, donde, con la varilla punta de bala, se golpeó 25 veces (figura 3.5). Posteriormente, se introdujo más concreto a la mitad del cono, anexando así 25 golpes; después de ello, se llenó dicho cono a su capacidad máxima, dando 25 golpes más, como se indica en esta norma. Una vez finalizado este proceso, se desmontó el cono y se colocó paralelo a la mezcla midiendo así el centro de la mezcla como referencia a la mitad de la varilla, obteniéndose un revenimiento de 7.5 cm para la mezcla.



Figura 3.5 Golpeo de la mezcla y determinación del revenimiento

3.6 Elaboración de cilindros de concreto

Una vez obteniendo el diseño junto con su revenimiento de cada mezcla, se continuó con la elaboración de los cilindros de concreto, donde, como primer paso, se aseguraron los moldes apretando los tornillos, esto con el fin de que, no existieran fugas al momento de introducir la mezcla en ellos. Con la ayuda de la pala y la cuchara de albañil, se comenzó a vaciar en los moldes las mezclas obtenidas; paralelo a ello, con la varilla se golpeó 25 veces la mezcla a su alrededor para evitar burbujas de agua o aire, según como lo dicta la norma NMX-C-163-ONNCCE-2019 (Secretaría de Economía, 2019). Por último, se etiquetaron los especímenes (figura 3.6):



Figura 3.6 Proceso de llenado de los cilindros. a) Revisión del molde del cilindro, b) Llenado de cilindros de concreto, c) Evidencia de etiquetado del cilindro

3.7 Desmontaje y curado de cilindros

Finalmente, para el desmontaje de los cilindros, transcurrieron 3 días después del diseño de mezcla, donde como primer paso, se desatornillan los moldes de cilindros por medios manuales. Posteriormente, se introdujeron en botes de 19 L y se llenaron con agua hasta cubrir los especímenes por completo como lo dicta la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2017 (Secretaría de Economía, 2017). Se marcaron los especímenes por medio de un gis con sus respectivas claves identificando aquellos que se retirarían a los días 7, 14 y 28 días después de su desmontaje para realizar las pruebas mecánicas (figura 3.7).



Figura 3.7 Preparación de los especímenes para la etapa de curado. a) Desmontaje de especímenes, b) Preparación de agua para curado, c) marcado de cilindros

Una vez que los especímenes quedaron cubiertos con agua, los botes se sellaron con plástico para reducir la pérdida de humedad (figura 3.8).



Figura 3.8 Curado de concreto y almacenamiento de especímenes

3.8 Ensayes de cilindros

Dentro del día 7, se extrajeron los 3 primeros cilindros con el 0% de sustituto de agregado grueso, otros 3 con el 25% de sustituto de tezontle, y 3 con el 100% de sustituto de tezontle. Se verificaron diámetros de los cilindros y con la prensa mecánica se tronaron los 9 cilindros el mismo día; se recolectaron los datos para el próximo análisis de resultados y se realizó el mismo procedimiento para los especímenes a los 14 y 28 días. Este proceso se rigió por la norma ASTM C39 (*American Society for Testing and Materials, ASTM C 127-07 (2017)*). Primero, se retiraron los cilindros de los botes de 19 L, luego se pesaron mientras estaban húmedos para determinar su capacidad de absorción de agua (figura 3.9).

Según, lo señala la norma ASTM C39 (*American Society for Testing and Materials, ASTM C 127-07 (2017)*), una vez curados los especímenes dentro de los días 7, 14 y 28, es necesario dejarlos escurrir el exceso de humedad y pesarlos para conocer su masa saturada al mismo tiempo que se registra la edad del concreto (7, 14 o 28 días). Posteriormente, con la ayuda del flexómetro se midieron los diámetros de los enraques para obtener el área total del cilindro.

Dentro de la figura 3.9, se muestran las placas de neopreno o cabezales. Estas se colocaron en el lecho inferior y superior del cilindro para introducirlos a la prensa hidráulica (figura 3.10). Cabe destacar que el día 28 según la norma (Secretaría de Economía, 2017), se indica que el concreto alcanza su resistencia máxima a la compresión.



Figura 3.9 Extracción del espécimen, proceso de pesado en báscula y separación de los cabezales de neopreno de los cilindros

Ya teniendo listo todo lo necesario para el ensaye, se colocó el cabezal lo más centrado al enrase del espécimen, ya que cuando se somete a la compresión, debe cuidarse que la fuerza aplicada de forma axial hacia el elemento sea lo más perpendicular al área del cilindro, ya que de otra forma puede mostrar los modos de falla que indica la norma NMX-C-414-ONNCCE-2017 (Secretaría de Economía, 2017).

Por último, el cilindro de concreto se colocó en la prensa y automáticamente, comenzó el ensaye, lo único que se debía esperar es que fallara el espécimen como lo muestra en la figura 3.10.

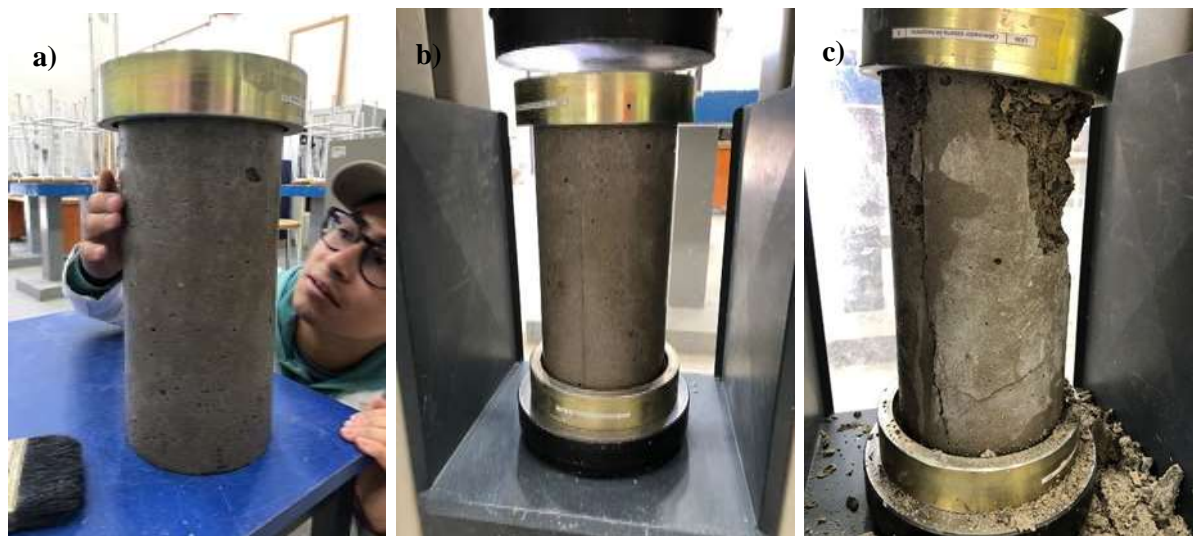


Figura 3.10 Obtención de la resistencia a la compresión. a) Colocación del cabezal de neopreno, b) Colocación del cilindro en la prensa, c) Falla del espécimen

3.9 Pruebas corrosión y oxidación en el concreto armado

Se elaboraron por triplicado especímenes de concreto regular y concreto modificado con el 25% y 100% de tezontle en sustitución del agregado grueso para realizar pruebas de absorción, corrosión y oxidación en un concreto armado. La composición de estos concretos tiene el mismo diseño de mezcla que el empleado en las pruebas anteriores. La única diferencia consistió en elaborar especímenes dentro de moldes de PVC de 4" de diámetro con una altura de 15cm (figura 3.11). Además, a estos cilindros se les sumergió una varilla de ½" que será la que determinará si el concreto modificado tiene problemas de filtración de humedad y, por ende, es capaz de oxidar y corroer el acero.

Una vez realizado el colado el concreto se dejó fraguar 24 horas para después someterse a las pruebas de curado acelerado. que, de acuerdo con este método (ONNCCE, 2016), los cilindros deben sumergirse en agua caliente a 36° centígrados y dejarse dentro durante 24 horas exactas, al término de estas 48 horas el concreto obtendrá su madurez y resistencia adecuada de 250 kg/cm² que fue el diseño de mezcla. Se empleó este método acelerado ya que la única intención era obtener los especímenes para realizar estas pruebas.



Figura 3.11 Molde de especímenes de pruebas de corrosión y oxidación

3.9.1 Pruebas de oxidación del concreto armado

Una vez elaborados los especímenes necesarios para realizar estas pruebas, se sumergieron en un tanque con una cámara de aspersión con capacidad de 1000 L. Dentro de este tanque se localiza una plataforma que tiene 4 rociadores de agua van conectados a una bomba de fuente, con capacidad de 40 L/min. Po medio de este sistema, se rociaron los cilindros durante 2 semanas con una solución de

agua desionizada con cloruro de sodio disuelto, conforme a la norma de la ASTM *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete* (ASTM, 2009). Este procedimiento provoca una oxidación y corrosión acelerada para poder identificar posibles problemas del concreto armado.

3.10 Evaluación económica

Para realizar esta evaluación económica del concreto regular y comparar su costo respecto al concreto modificado en este estudio, se revisaron diferentes factores, tales como la localización del material, su extracción y transporte, haciendo una comparativa principalmente entre la grava triturada y el tezontle.

En el siguiente capítulo se explica brevemente sus ventajas y desventajas, tanto económicas como mecánicas de ambos concretos.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Introducción

El concreto es uno de los materiales más utilizados en la construcción de estructuras, y su resistencia es una de las propiedades más importantes para garantizar su durabilidad y seguridad. En este sentido, el uso de agregados ligeros, como el tezontle, puede ser una alternativa interesante para reducir el peso y mejorar algunas propiedades del concreto.

El tezontle es un tipo de roca volcánica porosa y liviana que se encuentra en México. El tezontle puede ser utilizado como agregado en la producción de concreto, sustituyendo parcial o totalmente a la grava triturada convencional.

En este trabajo, se evaluó el comportamiento de cilindros de concreto aligerado modificado con tezontle en lugar de grava triturada. Para ello, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión, densidad y absorción de agua en distintos tiempos de curado (7, 14 y 28 días). Se evaluaron las propiedades del concreto modificado y compararon con las propiedades del concreto convencional para determinar las ventajas de incorporar otro tipo de agregados.

Los resultados obtenidos muestran que el uso de tezontle como agregado ligero modifica la resistencia del concreto, pero sí se obtiene una reducción significativa en el peso. Estos hallazgos pueden tener implicaciones importantes en la industria de la construcción, al ofrecer una alternativa viable y sostenible para la fabricación de estructuras de concreto.

4.2 Propiedades del concreto modificado

Como se mencionó anteriormente, se elaboraron 3 diseños de mezclas de concreto ($f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$) variando el porcentaje de sustitución de agregados gruesos (0%, 25% y 100%). Así mismo, se elaboraron especímenes por triplicado para determinar su resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días. Cada cilindro de concreto fue sometido a los mismos tipos de pruebas mecánicas para tener resultados más confiables.

4.2.1 Ensayo de cilindros a los 7 días de fraguado

Resistencia a la compresión

De acuerdo con lo realizado y analizado durante los ensayos de laboratorio, la resistencia obtenida en los diferentes tipos de cilindros se presenta en la siguiente tabla 4.1.

Tabla 4.1 Resultados del ensaye de cilindros a los 7 días de curado

Tipo de Cilindro	No. de cilindro	Datos generales de los cilindros				No. de cilindro	Datos promedio de los cilindros			
		Peso (kg)	Resistencia		%		Peso promedio (kg)	Resistencia media		%
			En kg/cm ²	En T				En kg/cm ²	En T	
0%	1	11.52	111.75	19.747	44.70	1	11.483	115.570	20.423	46.23
	2	11.47	121.54	21.478	48.62					
	3	11.46	113.42	20.043	45.37					
25%	1	10.93	153.69	27.159	61.48	2	10.963	162.750	28.760	65.10
	2	11.12	176.94	31.267	70.78					
	3	10.84	157.62	27.853	63.05					
100%	1	9.89	157.47	27.828	62.99	3	9.897	154.067	27.226	61.63
	2	9.92	151.15	26.710	60.46					
	3	9.88	153.58	27.139	61.43					

Como se puede apreciar en la información mostrada en la tabla 4.1, la resistencia obtenida en los diferentes especímenes es variada. De acuerdo con la Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno de la Ciudad de México, 2017), los cilindros del 0% de sustitución de tezontle obtuvieron una resistencia deficiente (44.70-48.62%); esto pudo deberse a las altas temperaturas registradas en las fechas de elaboración del concreto, debido a que provocaban un secado muy rápido de la mezcla. Además, cabe mencionar que las placas de neopreno que se emplearon el día del ensaye, se encontraban desgastadas; esto afecta indirectamente al ensaye, ya que provoca una lectura errónea en los cilindros.

En los siguientes ensayos se proporcionaron placas de neopreno nuevas por parte del laboratorio. Esto benefició los resultados de los siguientes especímenes evaluados, de acuerdo a la información de la tabla 4.1. Los cilindros con sustitución del 25% obtuvieron una resistencia promedio de 65.10%; esto está dentro de los valores esperados, como lo indica la norma antes mencionada (Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno de la Ciudad de México, 2017). En los cilindros con sustitución del 100%, se obtuvo una resistencia promedio de 61.63%; al igual que en los especímenes con 25% de sustitución, este rango obtenido también está dentro de los parámetros de la norma antes citada.

De igual manera, en la figura 4.1 se observa que el peso entre cada cilindro va disminuyendo considerablemente entre cada espécimen. Esto permitió crear una relación peso/resistencia, donde se pudo determinar que el peso no necesariamente influye en la capacidad de carga del concreto analizado.

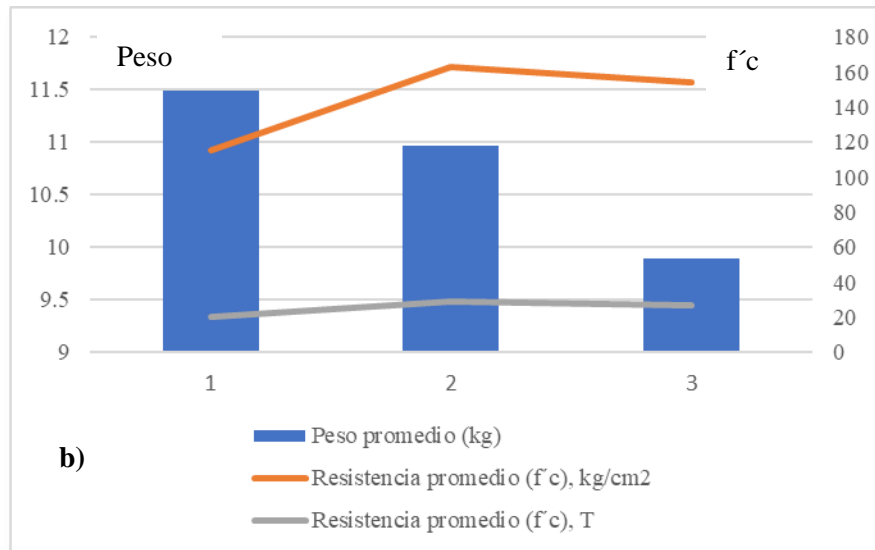
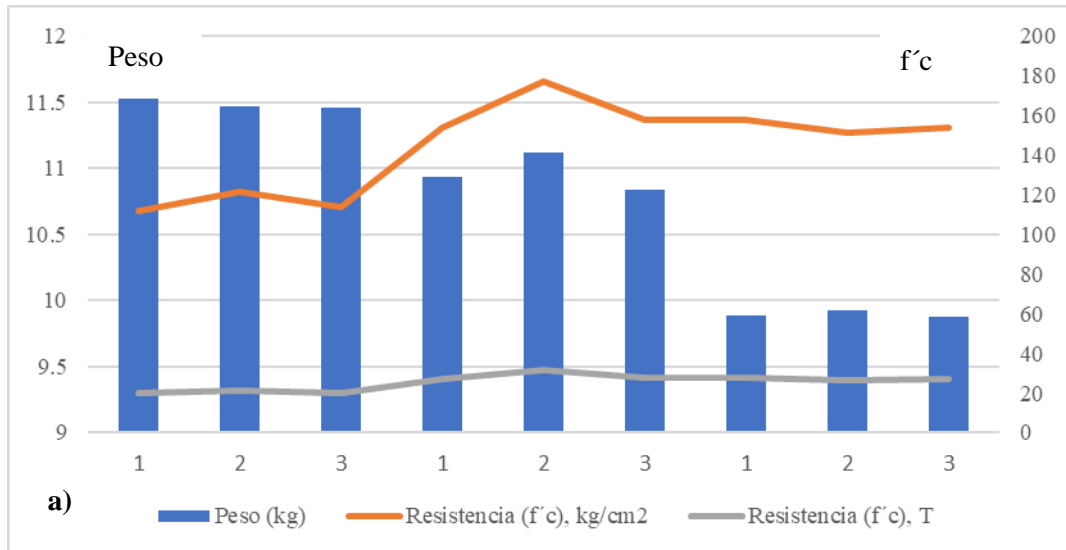


Figura 4.1 Relación peso/resistencia de los cilindros: a) generales y b) promedio

Teniendo en cuenta que, si se sustituye el 100% del contenido de gravas con tezontle, el peso del concreto modificado es 1.07 kg en promedio menor que el concreto normal, se obtiene un concreto 13% más ligero. Lo anterior puede ser un factor de interés en elementos estructurales, donde es deseable reducir el peso y los requerimientos técnicos de una edificación.

Teniendo en cuenta los datos mostrados en la figura 4.1, podemos observar que la relación de peso y resistencia va cambiando, ya que en estos primeros ensayos podría ser que, a mayor cantidad de tezontle, la resistencia mejora, pero esto podría ser solo debido a los factores que afectaron a nuestros primeros especímenes.

4.2.2 Ensaye de cilindros a los 14 días de fraguado

Resistencia a la compresión

En el segundo ensaye de cilindros, que fue a los 14 días de fraguado, se obtuvieron datos diferentes a los obtenidos en la primera etapa (7 días), ya que hubo algunos cambios con respecto a las resistencias esperadas. El resumen se presenta en la siguiente tabla 4.2.

Tabla 4.2 Resultados del ensaye de cilindros a los 14 días de fraguado

Tipo de Cilindro	No. de cilindro	Datos generales de los cilindros				No. de cilindro	Datos promedio de los cilindros			
		Peso (kg)	Resistencia		%		Peso promedio (kg)	Resistencia promedio		%
			En kg/cm ²	En T				En kg/cm ²	En T	
0%	1	11.43	153.91	27.198	61.56	1	11.463	152.193	26.895	60.88
	2	11.51	151.21	26.720	60.48					
	3	11.45	151.46	26.766	60.58					
25%	1	10.99	193.94	34.272	77.58	2	11.030	195.310	34.514	78.12
	2	11.07	195.08	34.473	78.03					
	3	11.03	196.91	34.798	78.76					
100%	1	9.75	186.44	32.946	74.58	3	9.900	185.817	32.836	74.33
	2	9.90	185.56	32.790	74.22					
	3	10.05	185.45	32.771	74.18					

De acuerdo con los resultados de la tabla 4.2, podemos observar que tuvieron menor resistencia a los 14 días respecto a los especímenes evaluados a 7 días. Considerando que la norma (Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno de la Ciudad de México, 2017) dicta que, a mayor tiempo de fraguado, la resistencia promedio esperada debería ser del 80%, el resultado a 14 días más cercano fue el del 25% de sustitución (78.12%), que es tan solo un 1.88% menor a la resistencia que se esperaba. Cabe mencionar que los cilindros del 0% de sustitución (concreto regular) siguen teniendo las resistencias más bajas respecto al concreto modificado, pero esto pudo deberse a lo que se especificó anteriormente con respecto a la influencia del clima y las altas temperaturas durante los días de elaboración de la mezcla del concreto.

A continuación, se presenta la relación que se obtuvo de peso y resistencia entre cada uno de estos especímenes fraguados a 14 días (figura 4.2).

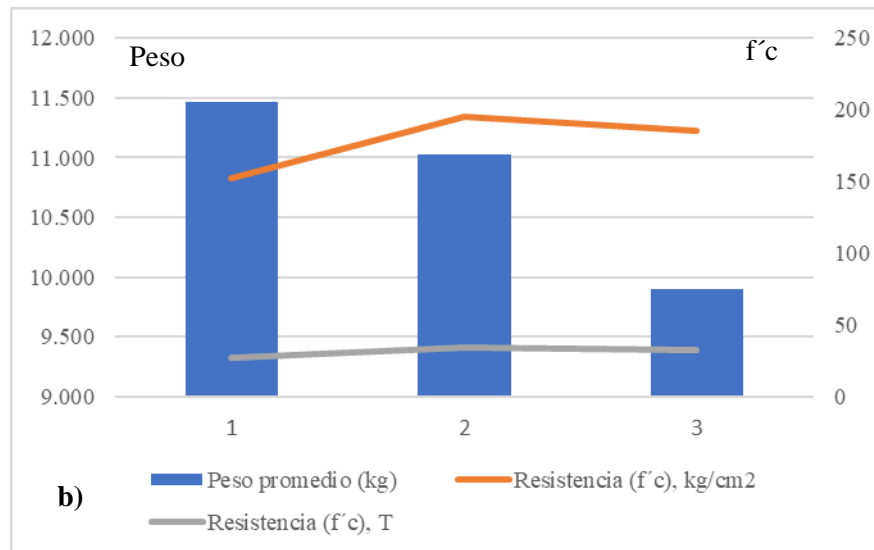
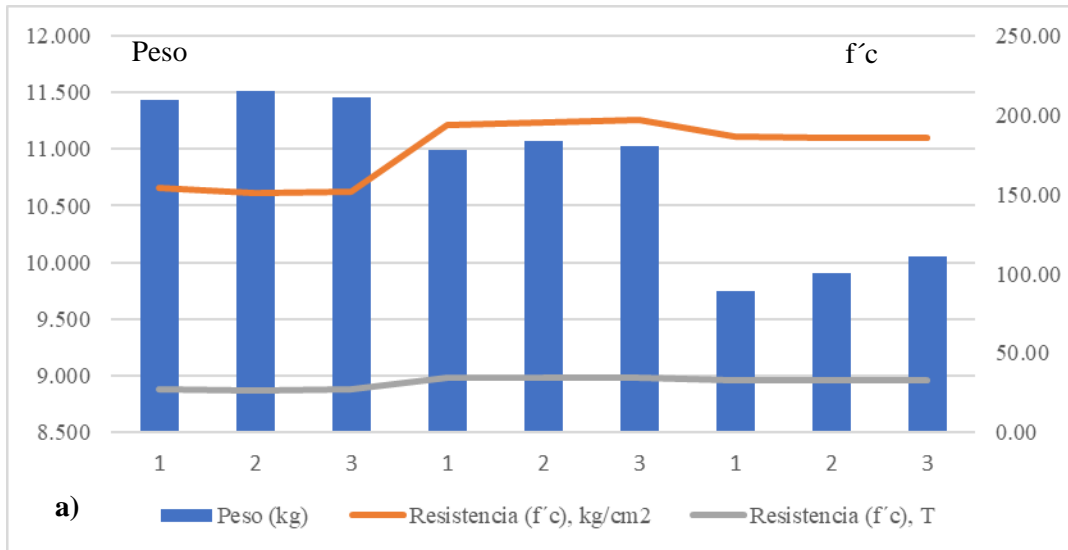


Figura 4.2 Relación de peso/resistencia de cada cilindro a 14 días de fraguado: a) generales y b) promedio

En la figura 4.2 puede observarse que se obtuvieron resultados similares a los del primer ensayo (7 días), aunque la resistencia de los cilindros del 100% obtuvieron resultados menos satisfactorios. Con lo anterior se puede decir que estos valores no se vieron tan afectados como los primeros ensayos. También, se destaca que la relación peso/resistencia es aceptable, ya que se obtuvo un 74.33% de resistencia. Debe tomarse en cuenta que el tezontle tiene propiedades mecánicas distintas a la grava, así que, si un concreto regular puede alcanzar el 80% de su valor esperado a los 14 días, el concreto modificado se acercó a este valor.

4.2.3 Ensaye de cilindros a los 28 días de fraguado

Resistencia a la compresión

En el tercer y último ensaye de cilindros que fue a los 28 días de fraguado se obtuvieron los siguientes resultados (tabla 4.3).

Tabla 4.3 Resultados del ensaye de cilindros a los 28 días de fraguado

Tipo de Cilindro	No. de cilindro	Datos generales de los cilindros				No. de cilindro	Datos promedio de los cilindros			
		Peso (kg)	Resistencia		%		Peso promedio (kg)	Resistencia promedio		%
			En kg/cm ²	En T				En kg/cm ²	En T	
0%	1	11.36	203.31	35.928	81.32	1	11.427	210.153	37.137	84.06
	2	11.45	211.38	37.354	84.55					
	3	11.47	215.77	38.130	86.31					
25%	1	10.95	156.35	27.630	62.54	2	10.943	149.413	26.404	59.77
	2	10.93	149.18	26.363	59.67					
	3	10.95	142.71	25.220	57.08					
100%	1	10.38	192.67	34.047	77.07	3	10.360	171.343	30.279	68.54
	2	10.33	163.48	28.890	65.39					
	3	10.37	157.88	27.899	63.15					

Como se muestra en la tabla 4.3, los resultados de los especímenes fraguados a 28 días variaron con respecto a los obtenidos en los otros ensayes (7 y 14 días). Esta variación puede deberse a que los especímenes con 0% de sustitución tuvieron una resistencia promedio del 84.06% respecto al valor esperado ($f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$). Este valor se pudo ver afectado por el método de elaboración de la mezcla, ya que como se mencionó en la metodología, estos especímenes fueron hechos por métodos manuales; a su vez, requirieron mayor cantidad de agua durante su elaboración. Se puede decir que no saturar el material (gravas) antes de elaborar la mezcla pudo provocar un mayor consumo de agua y una menor resistencia.

De igual manera se pueden detallar los resultados obtenidos de la relación peso/resistencia, que se muestran a continuación (figura 4.3). En esta figura se pueden apreciar los pesos y las resistencias obtenidas durante los ensayes a 28 días. Como ya se mencionó, los especímenes pueden tener una resistencia menor a la esperada debido al método convencional de elaboración de la mezcla del concreto. Esto da como indicio que el concreto modificado con tezontle requiere algunas modificaciones durante la preparación de los materiales a utilizar para elaborar la mezcla, para evitar que la porosidad de éste absorba mayor cantidad de agua de la cuantificada en el diseño original. En

el capítulo anterior se describió que el tezontle se saturó en agua previamente durante 5 minutos aproximadamente o hasta ver que el material está saturado y se añadió a la mezcla; esto demostró que no fue necesario modificar la cantidad de agua del diseño, pues sus propiedades mecánicas fueron las esperadas.

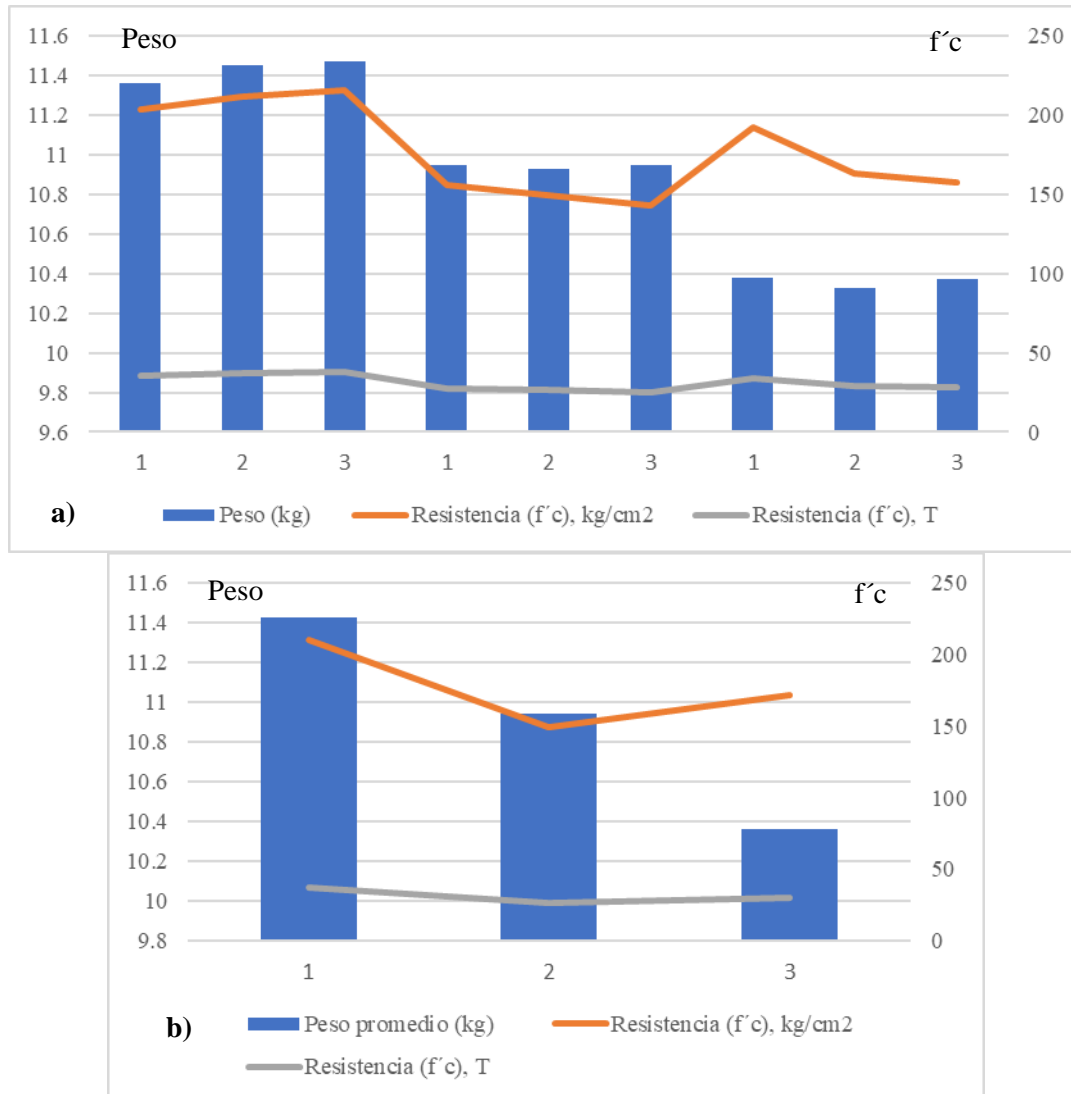


Figura 4.3 Relación de peso y resistencia de cada cilindro a 28 días de fraguado: a) generales y b) promedio

4.2.4 Promedio de ensaye de cilindros

De acuerdo con lo visto en los diferentes ensayos presentados y los diferentes resultados obtenidos, es posible determinar que el método de la saturación del tezontle antes de añadirlo en la mezcla del concreto modificado fue adecuado. Esto se confirmó al obtener un concreto resistente y ligero ya que,

como se pudo observar, tan solo a los 14 días de fraguado se obtuvieron resistencias promedio de 195.310 kg/cm^2 y 185.817 kg/cm^2 en los especímenes del 25% y el 100%. Éstos son valores aceptables si tomamos en cuenta que representan el 78.12% y el 74.33% de la resistencia de diseño (250 kg/cm^2). De acuerdo con la norma (Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno de la Ciudad de México, 2017), el promedio de resistencia que se debe obtener a los 14 días es del 80%, por lo que al considerar que el tezontle es un material con características mecánicas diferentes a las de la grava triturada, los valores obtenidos en este trabajo son alentadores para próximas investigaciones donde se mejoren condiciones durante el diseño y elaboración de la mezcla.

4.3 Potencial de corrosión en concreto

La corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto reforzado es un fenómeno de gran importancia en la construcción. La exposición a ambientes agresivos como la presencia de cloruros, humedad y otros agentes, puede llevar a la degradación prematura de estas estructuras, lo que a su vez puede comprometer su integridad y seguridad a lo largo del tiempo (Molina-Benavente, 2009).

El monitoreo y la evaluación de los potenciales de corrosión se han convertido en una práctica fundamental para prevenir y mitigar los efectos adversos de la corrosión en el concreto reforzado (Roa-Rodríguez, Aperador-Chaparro y Delgado-Tobón, 2015). La comprensión de los potenciales de corrosión es esencial para tomar decisiones informadas sobre la conservación y mantenimiento de las estructuras, así como para diseñar estrategias efectivas de protección contra la corrosión.

En este contexto, esta parte de la investigación se enfoca en el estudio de los potenciales de corrosión en concreto reforzado, utilizando como referencia la normativa ASTM C876-09 (ASTM, 2016) y considerando la variable del porcentaje de tezontle en sustitución de las gravas. A través de un análisis detallado de los potenciales de corrosión, se busca contribuir al conocimiento y la comprensión de este fenómeno, así como aportar a la toma de decisiones relacionadas con la durabilidad y el mantenimiento de las estructuras de concreto reforzado utilizando materiales alternos como el tezontle.

El seguimiento y la interpretación de los potenciales de corrosión se llevaron a cabo siguiendo las pautas establecidas en la Norma ASTM C876-09 (ASTM, 2016). Los resultados obtenidos de la medición de dichos potenciales, en presencia de una concentración corrosiva de NaCl al 3.5%, se obtuvieron mediante el empleo de una cámara de aspersion de cloruros, diseñada para acelerar el proceso corrosivo y evaluar posibles variaciones entre los diferentes sistemas en estudio.

En la figura 4.4 se presentan las representaciones gráficas correspondientes a los especímenes de concreto reforzado, cada uno con distintos porcentajes de contenido de tezontle (0%, 25%, y 100%), replicados en tres ocasiones. Estos análisis se realizaron considerando como factor de evaluación el porcentaje de agregado grueso, en este caso, el tezontle.

Los resultados obtenidos revelan que no se observa una alteración significativa en los valores de los potenciales de corrosión a medida que transcurre el tiempo de exposición. Por lo tanto, se concluye que la sustitución del agregado grueso de tezontle en el concreto no incide de manera apreciable en el proceso de corrosión estudiado.

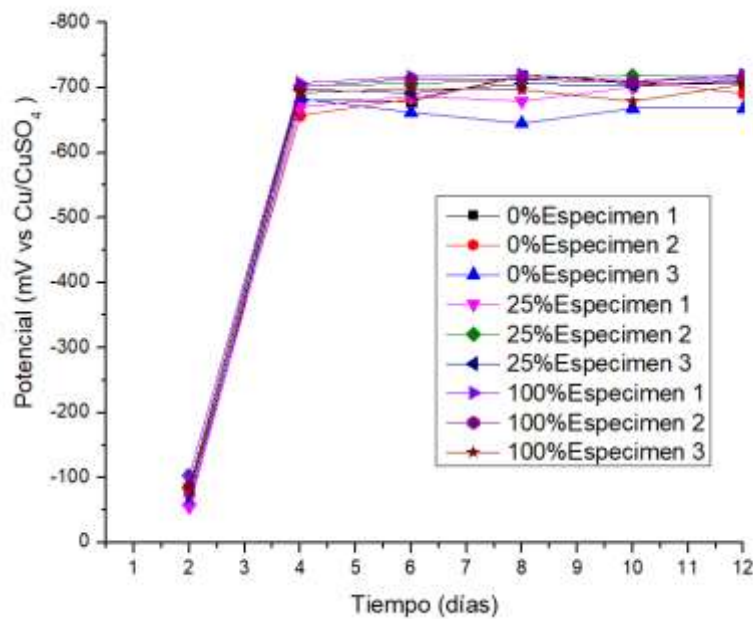


Figura 4.4 Especímenes de concreto con distintos porcentajes de tezontle (0%, 25%, y 100%) como agregado grueso, expuestos a un medio corrosivo con una concentración de 3.5% de NaCl y en función del tiempo

4.4 Discusión de los resultados obtenidos

De acuerdo con todos los resultados presentados en este capítulo, se observaron muchos detalles que se deben considerar importantes a la hora de diseñar este tipo de concreto.

El concreto es uno de los materiales más utilizados en la construcción debido a su alta resistencia y durabilidad. Sin embargo, su densidad es uno de los principales inconvenientes en algunas aplicaciones, especialmente cuando se requiere reducir el peso total de una estructura. En estos casos, el concreto ligero puede ser una solución viable, y la alternativa considerada en este trabajo fue

sustituir el agregado grueso convencional por tezontle, un material de origen volcánico utilizado comúnmente en muchas regiones de México.

4.4.1 Densidad y peso del concreto

Para diseñar con éxito un concreto ligero con tezontle, es esencial considerar varios factores. Uno de los más importantes es el peso específico del material, que debe ser lo suficientemente bajo para lograr una densidad reducida en la mezcla. El peso específico del tezontle puede variar entre 700 y 1200 kg/m³, lo que lo convierte en una opción ideal para el concreto ligero (Tena, Liga, Pérez y González, 2017), mientras que el peso específico de la grava triturada es de 2600 a 2700 kg/m³ una diferencia considerable en estos 2 materiales (DOF - Diario Oficial de la Federación, 2018). En los análisis realizados durante esta investigación se puede apreciar que, a mayor sustitución de tezontle en lugar de gravas trituradas, mayor es la reducción del peso. Lo anterior se debe a que el tezontle es poroso y genera vacíos dentro del concreto, lo que permite que sea un material más ligero.

4.4.2 Resistencia del tezontle y el concreto modificado

Además del peso específico, también es crucial considerar la resistencia del tezontle. La resistencia a la compresión del material puede variar ampliamente dependiendo de su fuente, su densidad y porosidad, por lo que es importante realizar pruebas en el material que se utilizará en la mezcla de concreto. Según un estudio realizado por Aragón, Sánchez, López y Pacheco (2015), el tezontle utilizado en concreto ligero tiene una resistencia a la compresión que oscila entre 1.2 y 5.5 MPa, en función de la densidad y la porosidad del material. Esto en comparación con la resistencia de la grava triturada, que oscila entre los 7 Mpa y los 12 Mpa, es una diferencia notoria, de un 50% aproximadamente; este se considera un dato que podría alterar los resultados del diseño del concreto, y es uno de los factores por el cual la capacidad de carga del concreto modificado en este trabajo se vio afectada.

4.5 Análisis de costo/beneficio del concreto modificado

Realizar este concreto modificado consistió en un procedimiento sencillo en el tema de la elaboración de la mezcla, ya que los cambios que existen dentro de la preparación requirieron muy pequeñas variaciones (explicadas en apartados anteriores). Sin embargo, conseguir el tezontle localmente puede ser un inconveniente, ya que es una roca volcánica porosa de color rojo o rosado que se encuentra en diversas regiones de México, especialmente en áreas con una actividad volcánica significativa. Algunas de las zonas donde se puede encontrar tezontle en México incluyen:

1. Ciudad de México: El tezontle es ampliamente utilizado en la construcción y la jardinería en la Ciudad de México debido a su disponibilidad en la región. Se extrae de canteras en las áreas cercanas a la capital y se utiliza en la construcción de edificios, muros y jardines.
2. Estado de México: En el Estado de México, que rodea a la Ciudad de México, también se pueden encontrar yacimientos de tezontle.
3. Puebla: Otra zona con actividad volcánica significativa, donde también se encuentra tezontle en ciertas áreas.
4. Morelos: Algunas regiones de Morelos, un estado vecino de la Ciudad de México, también tienen yacimientos de tezontle.
5. Hidalgo: El estado de Hidalgo, ubicado en el centro de México, es conocido por tener rocas volcánicas, incluido el tezontle, que se utilizan en la construcción y la decoración de jardines.

Es importante considerar que la extracción de este material está sujeta a regulaciones y consideraciones ambientales (NORMA Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009), por lo que siempre es necesario obtener los permisos requeridos y cumplir con las leyes locales antes de realizar cualquier actividad de extracción de rocas. Además, la disponibilidad y la ubicación exacta de los yacimientos de tezontle pueden cambiar en función de su vida productiva útil, por lo que es recomendable consultar con autoridades locales o expertos en geología para obtener información actualizada sobre su ubicación específica. Explicado esto, puede identificarse que el tezontle es un material fácil de extraer, pero no se encuentra disponible en todo el país.

El costo de hacer un metro cúbico (m^3) de concreto con resistencia $f'c$ de 250 kg/cm^2 en la zona centro de México puede variar según varios factores, incluyendo los precios locales de los materiales y la mano de obra, así como la cantidad de concreto que se requiere para determinado proyecto.

Para esta evaluación, a continuación, se muestran precios de los materiales en pesos mexicanos actuales:

1. Cemento: El costo del cemento puede variar, pero como referencia, el precio promedio del cemento Portland en México en 2021 era de alrededor de 1,100 a 1,400 pesos mexicanos por tonelada. La cantidad de cemento requerida para un metro cúbico de concreto dependerá de la proporción de la mezcla, pero aproximadamente se requiere de 300 a 350 kg de cemento por metro cúbico.

2. Agregados (arena y grava triturada): Los agregados son otro componente importante del concreto. El costo de la arena y la grava puede variar según la ubicación, pero el precio promedio en 2021 era de alrededor de 300 a 500 pesos mexicanos (M.N.) por metro cúbico.
3. Agua: El agua generalmente tiene un costo menor en comparación con el cemento y los agregados (\$188.23 M.N. por metro cúbico en la zona, Competitividad, I. M. P. (2023))
4. Mano de obra: Los costos de mano de obra varían según la región y el acuerdo con los trabajadores, pero este es un componente importante del costo total. El costo aproximado en el estado de Hidalgo es de \$207.44 M.N. (Comisión Nacional de los Salarios Mínimos, 2023)
5. Transporte: Debe considerarse el costo de transportar los materiales y el concreto al sitio de construcción. Este costo generalmente no se considera como un concepto independiente, debido a que el flete (comúnmente llamado así el transporte) no se cobra a menos que la distancia de entrega sea fuera de la zona donde se encuentre la casa de materiales, relativamente siempre se busca pedir material a las casas de materiales cercanas para evitar costos adicionales a la obra.
6. Equipo y herramientas: Si no se posee el equipo y las herramientas necesarias, es posible que deban alquilarse, lo que aumentará los costos.

El precio unitario de 1 m³ de concreto es de \$1750 M.N., y si se toma en cuenta que el concreto con tezontle y el concreto normal se elaboran bajo un procedimiento similar, puede considerarse solo el cambio de precio del tezontle; que material este oscila entre los \$400 y \$600 M.N. por metro cúbico. Este cambio solo incrementa \$50 M.N. el precio de 1 m³ de concreto, lo que lo hace un producto rentable.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El estudio realizado demuestra que es posible obtener un concreto para uso estructural ligero con sustitución del tezontle, manteniendo una resistencia similar a la del concreto común. Para lograr este objetivo, se siguieron los parámetros de diseño de la norma mexicana correspondiente y se elaboraron 27 cilindros de concreto con diferentes porcentajes de sustitución de tezontle. Los resultados obtenidos indican que es posible obtener un concreto estructural ligero con una resistencia similar a la del concreto convencional, utilizando una sustitución de hasta el 25% de tezontle en lugar de gravas.

Aunque se siguió el procedimiento establecido en la norma nacional para elaborar el concreto, en el concreto modificado se observó que las resistencias a la compresión son más favorables y no demandan un consumo mayor de materiales; esto puede indicar que la clave de realizar el concreto modificado es saturar el tezontle antes de verterlo en la mezcla, ya que es un material más poroso que las gravas y tiende a absorber una mayor cantidad de agua si se mezcla seco.

Se puede determinar que el concreto modificado más viable es el que sustituye gravas con 25% de tezontle, ya que es el que mejor se adapta a las condiciones de un concreto convencional, sin alterar tanto la resistencia a la compresión. Este concreto modificado podría usarse como concreto para uso estructural. Las propiedades que hacen que el concreto modificado destaque respecto al concreto común son un menor peso y una resistencia a la compresión similar a la del concreto original. Es importante destacar que el concreto original puede tener una mayor densidad, lo que puede ser beneficioso en algunas aplicaciones.

Para que el concreto modificado pueda ser utilizado de forma segura es importante diseñar la mezcla a través de una norma o manual de diseño como el que se utilizó en este proyecto, además de que al momento de elaborarse debe tener una mayor exigencia de calidad, debido a que puede llegar a ser un poco más delicado que un concreto convencional.

Con base en el potencial de corrosión/oxidación, el concreto modificado podría funcionar bien en condiciones de alta humedad y exposición a agentes corrosivos, ya que presenta una mejor resistencia a la corrosión. Esto puede ser beneficioso en aplicaciones como la construcción de estructuras en ambientes marinos o en zonas con alta contaminación atmosférica.

Desde el punto de vista económico, se espera que el concreto modificado sea competitivo en el mercado si se logra una producción a gran escala y se reducen los costos de producción. La sustitución

parcial del agregado grueso por tezontle puede tener un impacto positivo en la reducción de costos, ya que el tezontle es un material local en muchas partes de México y más económico que el agregado grueso convencional. Además, el concreto modificado puede tener un menor peso, lo que puede reducir los costos de transporte y manipulación.

Cabe mencionar que el concreto modificado que se utiliza en la práctica de la auto construcción llega a contener hasta 100% de tezontle como agregados gruesos debido a su disponibilidad en algunas regiones del país. De acuerdo con los valores obtenidos en este trabajo, es importante considerar que se debe restringir el porcentaje de sustitución cuando no se tiene un buen proceso de elaboración de mezclas.

En general, se puede concluir que sí se puede crear un concreto ligero estructural sustituyendo el agregado grueso convencional por grava roja de tezontle, pero en un porcentaje no mayor del 25%, ya que si se utiliza en mayor cantidad podría comprometerse la integridad de la estructura o el elemento estructural que se diseñe con este material. Y en el caso del concreto que emplee hasta 100% de este tipo de agregados volcánicos, considerar algún aditivo que permita obtener una buena resistencia, aunque esto podría incrementar el costo de este mismo.

Es importante tener en cuenta que la sustitución del agregado grueso por escorias volcánicas puede requerir ajustes en la dosificación de los demás componentes de la mezcla, como el cemento y el agua, para obtener las propiedades deseadas en el concreto. Los resultados obtenidos en diversos estudios muestran que el concreto ligero con escorias volcánicas presenta características físicas y mecánicas similares o superiores a las del concreto ligero convencional. Además, se ha demostrado que este tipo de concreto tiene una menor conductividad térmica y una mayor resistencia a la absorción de agua, lo que lo convierte en un material adecuado para su uso en construcciones con requerimientos térmicos y acústicos, por lo que se recomienda explorar estas propiedades en próximas investigaciones.

Por último, la sustitución del agregado grueso por escorias volcánicas puede mejorar las propiedades del concreto ligero en términos de densidad, resistencia mecánica y durabilidad. Sin embargo, se requiere una cuidadosa dosificación de los componentes de la mezcla para obtener los resultados deseados.

5.2 Recomendaciones

De acuerdo con las observaciones que se hicieron durante el desarrollo del proyecto y las conclusiones obtenidas, se hacen las siguientes observaciones para mejorar el concreto diseñado.

1. El concreto diseñado puede obtener una mayor resistencia si se tiene un mejor control del agua y se agrega más cemento a la mezcla, aproximadamente entre un 5% y 10% más a la de un concreto convencional.
2. Debe saturarse el tezontle antes de verterse a la mezcla para obtener mejores resultados y no generar un gasto mayor de materiales.
3. Realizar pruebas de adherencia al acero, ya que al ser un material que se fractura, podría generar una mala adhesión al material.
4. Utilizar tezontle de buena calidad, evitando el material contaminado, ya que esto genera disgregación del agregado.

Referencias

1. Alfaro, A. (1913). Rocas volcánicas de Costa Rica. Boletín de Fomento, 8, 549-555.
2. Ali, M., Rashid, U., & Ahmad, S. (2014). Strength properties and durability of lightweight volcanic scoria aggregate concrete. Journal of Cleaner Production, 78, 75-83.
3. Al-Swaidani, A. M. (2012). Effect of lightweight aggregates on the properties of lightweight concrete. International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS, 12(04), 1-5.
4. ACI PRC-306-16: Guide to cold weather concreting (2016). Concrete.org. Recuperado el 12 de octubre de 2023, de https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=30616&Language=English&Units=US_AND_METRIC
5. ACI PRC-211.7-20: Guide for Proportioning Concrete Mixtures with Ground Calcium Carbonate and Other Mineral Fillers (2020). Recuperado el 12 de octubre de 2023, de https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=211720&Format=PROTECTED_PDF&Language=English&Units=US_Units
6. ACI PRC-364.5-21: Importance of modulus of elasticity in surface repair materials - TechNote (2021). Concrete.org. Recuperado el 14 de octubre de 2023, de https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=364521&Format=PROTECTED_PDF&Language=English&Units=US_Units
7. ACI PRC-211.5-14: Guide for submittal of concrete proportions. (s/f) (2023). Recuperado el 14 de octubre de 2023, de https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=211514&Language=English&Units=US_AND_METRIC
8. ASTM D6114/D6114M: Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder (2009). American Society for Testing and Materials. Recuperado el 14 de octubre de 2023 de <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/103890/f5b339ba771346af9598c77deb461cb3/ASTM-D6114-D6114M-19.pdf>
9. ASTM C876-09: Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in Concrete (2016). American Society for Testing and Materials. Recuperado el 14 de octubre de 2023 de <https://www.astm.org/c0876-09.html>
10. ASTM C 39/C 39M (2017) Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens (2017). American Society for Testing and Materials. Recuperado el 14 de octubre de 2023 de <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/1504/c51b44b19f354c549e5d988fa24cebc1/ASTM-C39-C39M-01.pdf>
11. ASTM C 127-07: Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate (2017). American Society for Testing and Materials. Recuperado el 14 de octubre de 2023 de <https://www.laboratuar.com/es/testler/astm-testleri/astm-c127-iri-agreganin-bagil-yogunlugu-ve-emilmesi-icin-standart-test/>

12. Aragón, R., Sánchez, J. A., López, R., Pacheco, J. (2015). Comportamiento mecánico de mezclas de concreto ligero con agregado de tezontle. *Revista Internacional de Ingeniería de Investigación y Desarrollo*
13. Asociación Mexicana de Normalización y Certificación. (2016). Tezontle. Especificaciones y métodos de prueba. México.
14. Brown, A. (2015). The role of concrete in the industrial revolution. *Journal of Construction History*, 30(2), 45-57.
15. Chávez C., Arreygue E. Alarcón J. (2011). Caracterización Mecánica de la Escoria Volcánica (Tezontle), de la Zona de Morelia, Michoacán, México. *Pan-Am CGS Geotechnical Conference, 1*, 1–8
16. Chindaprasirt, P., Rukzon, S., Sirivivatnanon, V. (2017). Enhancing the durability properties of concrete using blended fly ash and rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 138, 363-371.
17. Cinturón Volcánico Transmexicano. (2022). Ecured.cu. Recuperado el 15 de noviembre de 2023, de http://www.ecured.cu/Cintur%C3%B3n_Volc%C3%A1nico_Transmexicano
18. Comisión Nacional de los Salarios Mínimos. (2023). Tabla de Salarios Mínimos Generales y Profesionales por Áreas Geográficas. gob.mx. Recuperado el 17 de noviembre de 2023, de <https://www.gob.mx/conasami/documentos/tabla-de-salarios-minimos-generales-y-profesionales-por-areas-geograficas>
19. Cruz, J. R., Robles, J. R., Cervantes, E. (2017). Physical and mechanical properties of volcanic scoria for lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 155, 1002-1010.
20. De Ensenada, M. (2018). Proyecto de extracción y cribado de escoria volcánica (tezontle) en el ejido Chapala, San Quintin, Baja California.
21. De occidente, L. P. (2020, agosto 7). Recinto Tezontle negro. METERIOTECA ITESO. <https://web.archive.org/web/20200708152246/https://blogs.iteso.mx/materioteca/product/recinto-tezontle-negro/>
22. Dehwah, H. A., Nadjai, A., Magee, B. (2019). Aggregate grading optimization in concrete mix design. *Construction and Building Materials*, 203, 338-347.
23. DOF - Diario Oficial de la Federación. (2018). Gob.mx. Recuperado el 14 de octubre de 2023, de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5543504&fecha=12/11/2018
24. Fernández Sola, L. R., & Martínez Galindo, G. (2012). Predicción analítica de la respuesta sísmica de pilas de concreto con distintos niveles de restricción en la cabeza. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, 4(1), 2–17. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-30112012000200001&script=sci_arttext
25. García, R., Escalante-García, J. I., Castro-Borges, P., Gómez-Soberón, J. M. (2016). Mechanical and physical properties of concrete with tezontle as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 127, 180-186.
26. García, M. F., Rodríguez, C. M., Robles, J. R. (2018). Thermal properties of lightweight concretes made with pumice and scoria aggregates. *Construction and Building Materials*, 172, 557-565.

27. García, R., Ulsen, C., Mejía de Gutiérrez, R., Alujas-Díaz, A. (2018). Effect of superplasticizers on the rheology and stability of cement pastes. *Construction and Building Materials*, 169, 416-425.
28. Roa-Rodríguez G., Aperador-Chaparro W., Delgado-Tobón E. (2015). Diseño de sistema de monitoreo remoto para evaluación de la corrosión en estructuras de concreto reforzado sometidas a ion cloruro. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(4), 565-572.
29. Gobierno de la CDMX. (2020, julio 6). Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de acero con comentarios. *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*
30. González Corominas, A., Etxeberria, M., Torgal, F. P., Castro-Gomes, J. (2018). Lightweight concrete produced with volcanic slag as coarse aggregate. *Materials*, 11(11), 2193.
31. González, D. A., Mendoza, M. J. (2016, October). Caracterización mecánica de escoria volcánica compactada de la Ciudad de México y sus alrededores. In *ISRM 2nd International Specialized Conference on Soft Rocks*. OnePetro.
32. Güneysi, E., Gesoğlu, M., Mermerdaş, K., Gencil, O. (2021). Properties of lightweight concrete using perlite aggregate and waste ash. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125074.
33. INEGI (2018). Construcción. Cuéntame de México. Recuperado el 4 de octubre de 2023, desde: <https://cuentame.inegi.org.mx/economia/secundario/construccion/default.aspx?tema=e>
34. Ituza-Revilla, M. Y., Ticona-Huilca, J. M. (2019). Propuesta de Diseño de Concreto de Baja Densidad con Agregados Naturales e Industriales, Aplicada en el Diseño de una Edificación Sobre un Suelo con Baja Capacidad Portante en la Ciudad de Arequipa.
35. Johnson, R. (2012). Concrete in ancient Rome: Understanding the Roman Concrete Standard Practice. *Construction History*, 27(2), 39-50.
36. Jones, T. (2020). The use of concrete in modern construction. *Construction Technology Today*, 45(3), 87-102.
37. Khayat, K. H. (2016). Rheology, workability, and early-age properties of concrete admixtures: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Composites*, 73, 267-281.
38. Kumawat, M. K., Shekhawat, A. K. (2016). Effect of incorporation of volcanic ash on the strength and durability of concrete: a review. *Materials Today: Proceedings*, 3(10), 3491-3499.
39. Instituto Mexicano para la Competitividad (2023, agosto). ¿Cuál es el costo real del agua en Mexico? El costo del agua en México: Un análisis de tarifas y de sus impactos para la sociedad | Investigación.
[//efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://imco.org.mx/wpcontent/uploads/2023/08/Investigacion_Costo-real-del-agua-en-Mexico_31082023.pdf](https://imco.org.mx/wpcontent/uploads/2023/08/Investigacion_Costo-real-del-agua-en-Mexico_31082023.pdf)
40. López, M., Torres-Castillo, A., Burciaga-Díaz, O. (2016). Mechanical and physical properties of lightweight concrete manufactured with natural pumice and tezontle. *Construction and Building Materials*, 112, 608-616.
41. López, M., Torres-Castillo, A., Burciaga-Díaz, O. (2019). Effect of cement content on the physical and mechanical properties of lightweight concrete with volcanic scoria as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 225, 667-676.

42. González M, D. A., Mendoza L, M. J. (2016). Caracterización mecánica de escoria volcánica compactada de la Ciudad de México y sus alrededores. In ISRM International Specialized Conference on Soft Rocks (pp. ISRM-ICSR). ISRM.
43. Mehta, P. K. (2000). Concrete technology for sustainable development. *Cement and Concrete Research*, 30(2), 227-237.
44. Mehta, P. K. (2014). Green high-performance concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12(9), 305-316.
45. Miller, S. (2018). The invention of Portland cement and its impact on construction. *Journal of Engineering Innovations*, 12(1), 15-30.
46. Mindess, S., Young, J. F., Darwin, D. (2003). *Concrete*. Pearson Education.
47. Molina Benavente, E. R. (2009). Monitoreo y diagnóstico de estructuras de concreto armado afectadas por corrosión de cloruros.
48. Morales, L. R. (2015). La práctica constructiva en la ciudad de México. El caso del tezontle, siglos XVIII-XIX. *Revista INAH*.
49. Müller, U. (2018). *Admixtures for concrete: Improvement of properties*. Woodhead Publishing.
50. NOM-157-SEMARNAT-2009. Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. (s/f). Gob.mx. Recuperado el 15 de noviembre de 2023, de <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4485/semarnat1/semarnat1.htm>
51. N. T. P. 400.010 ASTM D 75 (2016) AGREGADOS. Extracción y preparación de las muestras.
52. Ondas sísmicas. (2016). Udc.es. Recuperado el 15 de noviembre de 2023, de https://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Investigacion/Terremotos/ondas_s%EDsmicas.htm
53. ONNCCE (2016), NMX-C-290-ONNCCE-2010, Concreto Hidráulico - Determinación del Curado Acelerado para el Ensayo a Compresión de Especímenes. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificaciones. Recuperado el 1 de octubre de <https://www.onncce.org.mx/es/venta-normas/fichas-tecnicas?view=item&id=1875#:~:text=NMX%2DC%2D290%2DONNCCE%2D2010&text=Esta%20norma%20mexicana%20establece%20tres,acelerar%20el%20desarrollo%20de%20resistencia>.
54. Ortiz-Hernández, L. E., Escamilla-Casas, J. C., Cruz-Chávez, E., Castro Mora, J. (2016). Marco geológico regional y litológico de la zona arqueológica de Huapalcalco, Tulancingo, Hidalgo. *Tópicos De Investigación En Ciencias De La Tierra y Materiales*, 3(3), 111-119
55. Panteón de Agripa de Roma. (2019). Rome-museum.com. Recuperado el 13 de octubre de 2023, de <https://www.rome-museum.com/es/panteon-roma.php>
56. Pérez, M. (2013). Concreto. Material de construcción del siglo XXI. IMCYC, consultado el 24 de julio de 2023 desde: <https://www.imcyc.com/cyt/junio04/siglo.htm>
57. Rivera Villareal, R. (2001), Investigación de concretos sin finos con agregados de escoria. Recuperado el 14 de octubre de 2023, de

[//efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1020082529/1020082529_051.pdf](http://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1020082529/1020082529_051.pdf)

58. Ramírez, E. A., Díaz, D. D., Lozano, M. A. (2019). Tezontle as coarse aggregate in lightweight concrete. *Materials Science Forum*, 985, 227-232.
59. Revista Construye, (2022) Los tipos de concreto., consultado el 24 de julio de 2023 desde: <https://www.revistaconstruye.com.mx/ingenierias/2386-los-tipos-de-concreto.html>
60. Rodríguez Díaz, E., Salcedo Pérez, E., Rodríguez Macias, R., González Eguiarte, D. R., Mena Munguía, S. (2013). Reúso del tezontle: efecto en sus características físicas y en la producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Terra Latinoamericana*, 31(4), 275–284. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792013000500275
61. Salazar Márquez, H. I. (2018). Efectos del concreto ligero con agregados de roca volcánica en la fabricación de postes en el Perú.
62. Secretaria de Economía. (2010). Norma Mexicana NMX-C-156-ONNCCE-2010. “Industria de la Construcción- Cementantes Hidráulicos- “Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco”
63. Secretaría de Economía. (2014). Norma Mexicana NMX-C-486-ONNCCE-2014 “Industria de la Construcción- Mampostería- “Mortero para Uso Estructural- Especificaciones y Métodos de Ensayo”
64. Secretaría de Economía. (2016). Norma Mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2016 "Concreto ligero especificaciones y métodos de prueba".
65. Secretaría de Economía. (2017). Norma Mexicana NMX-C-212-ONNCCE-2017 "Industria de la construcción - Cemento con adiciones - Especificaciones y métodos de prueba".
66. Secretaría de Economía. (2017). Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2017 “Industria de la Construcción- Cementantes Hidráulicos- “Especificaciones y Métodos de Ensayo”.
67. Secretaria de Economía. (2019). Norma Mexicana NMX-C-163-ONNCCE-2019. “Industria de la Construcción- Cementantes Hidráulicos- “Determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto- Método de ensayo”
68. Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno de la Ciudad de México. (2017). Norma Técnica Complementaria NTC-RCDF-2017 "Construcción de obras y edificaciones con materiales y sistemas sustentables en la Ciudad de México". Recuperado de <https://www.seduvi.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/NTC-RCDF-2017.pdf>
69. Serrano Cordova, P. F. (2018). Elaboración de un concreto ligero para uso estructural en la ciudad de Lima metropolitana 2018.
70. Smith, J. (2010). The secrets of ancient Egyptian concrete. *Archaeology Today*, 24(4), 75-89.
71. Smith, M. (2019). The role of concrete in modern infrastructure. *Construction Management Review*, 55(1), 112-129.
72. Tena, A., Liga, A., Pérez, A., González, F. (2017). Proposal for improved mixes to produce concrete masonry units with commonly used aggregates available in the Valley of Mexico. *Revista ALCONPAT*, 7(1), 36–56. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i1.170>

73. Tovar, E. (2023, mayo 30). Concreto fotocatalítico: Un enfoque sostenible para la calidad del aire en la construcción. ArchDaily México. <https://www.archdaily.mx/mx/999556/concreto-fotocatalitico-un-enfoque-sostenible-para-la-calidad-del-aire-en-la-construccion>
74. Trejo-Téllez, L. I., Ramírez-Martínez, M., Gómez-Merino, F. C., García-Albarado, J. C., Baca-Castillo, G. A., Tejeda-Sartorius, O. (2013). Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(SPE5), 863-876.
75. Tunçdemir, M., Altun, F., Gültekin, A. H. (2017). Investigation of the effects of natural pumice and volcanic slag on concrete properties. *Construction and Building Materials*, 141, 220-229.
76. uDocz. (2021). Línea de Tiempo Historia del Concreto. *uDocz*. <https://www.udocz.com/apuntes/216364/linea-de-tiempo-historia-del-concreto>
77. Venta de tezontle en CDMX. (2020, agosto 13). Granitosybarroshidalgo.com; Granitos y Barros Hidalgo. <https://www.granitosybarroshidalgo.com/catalogo/materiales-de-construccion/tezontle/>
78. Vilca-Olivera, M. A. (2022). Propiedades físicas y mecánicas del concreto poroso $f^c = 175 \text{ kg/cm}^2$ en pavimento rígido empleando toba volcánica, Cusco-2022.
79. Zeyad, A. M., Johari, M. M., Tayeh, B. A., Yusuf, M. O. (2016). Efficiency of treated and untreated palm oil fuel ash as a supplementary binder on engineering and fluid transport properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 1066-1079.